30

НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ БИБЛИОТЕКА

А. Ф. ПЛОНСКИЙ

Пьезоэлектричество

SHOUT
SHARE
IT

Annotation

В этой книге рассказывается о природе и практическом применении одного из интереснейших явлений природы, которое получило название пьезоэлектрического эффекта…

- Александр Плонский
  -
  - Введение
  - 1. Строение вещества
  - 2. Кристаллы
  - 3. Свойства кристаллов
  - 4. Кристалл кварца
  - 5. Природа пьезоэлектричества
  - 6. Пьезоэлектрические текстуры
  - 7. О неслышимых звуках
  - 8. Поющий кристалл
  - 9. О необыкновенном манометре
  - 10. Как пьезоэлектрическая пластинка измеряет ускорение
  - 11. Изучение вибраций
  - 12. «Ухо» хирурга
  - 13. Пьезоэлектрический резонатор
  - Новое в пьезоэлектрической технике
  - Что читать о пьезоэлектричестве
- notes
  - 1
  - 2

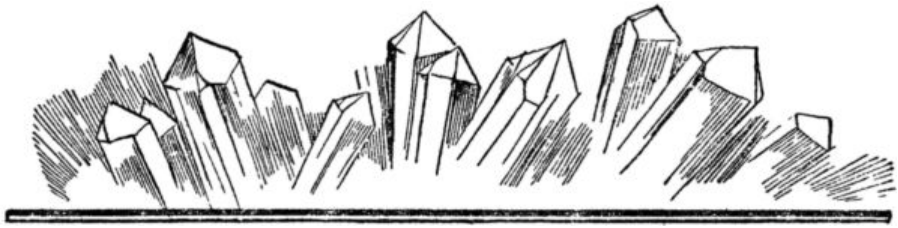
Александр Плонский
ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСТВО

НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ БИБЛИОТЕКА
ВЫПУСК 60

А. Ф. ПЛОНСКИЙ

ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСТВО

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ТЕХНИКО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
МОСКВА 1953



Введение

В этой книге рассказывается о природе и практическом применении одного из интереснейших явлений природы, которое получило название пьезоэлектрического эффекта.

Это явление было впервые обнаружено ещё в конце прошлого века, но в течение десятков лет его считали своеобразным научным «курьёзом», не имеющим какой-либо практической ценности. Однако впоследствии оказалось, что такая оценка была неверной. Умелое использование пьезоэлектрического эффекта позволило решить целый ряд научных и технических проблем. В наши дни приборы, построенные на использовании пьезоэлектричества, применяются во многих отраслях промышленности и народного хозяйства, таких, как авиация, железнодорожный и автомобильный транспорт, машиностроение, радиотехника, электротехника, акустика, астрономия, биология, гидрология, медицина, метеорология и т. д.

На примере пьезоэлектричества видно, что, каким бы на первый взгляд отвлечённым ни казалось научное открытие, оно находит своё практическое применение.

Чистой науки, о которой лицемерно твердят некоторые буржуазные учёные, нет. Наука плодотворна лишь тогда, когда она неразрывно связана с практикой. Наша материалистическая наука, вооружённая передовым марксистско-ленинским мировоззрением, носит целеустремлённый характер, имеет своей прямой целью дальнейшее укрепление народного хозяйства нашей Родины.

В этой небольшой книге рассказывается о пьезоэлектричестве. Чтобы понять его природу, необходимо предварительно познакомиться со строением и свойствами окружающих нас предметов.

1. Строение вещества

Нас окружает множество различных тел. Любое из них — микроскопическая пылинка и гигантский утёс, вода и воздух, металл и стекло — состоит из вещества. Вещество построено из чрезвычайно мелких частичек — атомов различных химических элементов. В большинстве веществ атомы объединяются между собой в более крупные частицы — молекулы. Размеры атомов ничтожно малы: они не превышают нескольких стомиллионных долей сантиметра.

Учёные установили, что атомы имеют сложное строение и состоят из мельчайших электрически заряженных частиц. В центре любого атома находится положительно заряженное ядро. Вокруг ядра вращаются отрицательно заряженные частички — электроны, образующие электронную оболочку атома. Диаметр этой оболочки приблизительно в 100 000 раз больше диаметра ядра.

В своём обычном состоянии атом электрически нейтрален. Это значит, что положительный заряд ядра уравновешен отрицательными зарядами электронов.

Атомы различных химических элементов (например, атомы водорода, натрия, кремния и т. д.) отличаются друг от друга числом электронов, а также весом и зарядом ядра. На рис. 1 схематически показана структура некоторых атомов.

Рис. 1. *Упрощённая схема строения атомов водорода, углерода и серы.*

Если из электронной оболочки атома каким-нибудь образом удалить один или несколько электронов, то равновесие положительных и отрицательных зарядов в атоме нарушится, в результате чего он уже не будет электрически нейтрален. Поскольку в этом случае положительный заряд больше отрицательного, атом в целом окажется заряженным положительно. Такой атом называют положительным ионом. Если, напротив, добавить в электронную оболочку атома один

или несколько электронов, то он приобретёт отрицательный заряд и превратится в отрицательный ион. Чтобы ионизовать атом, необходимо затратить работу на преодоление связывающих его электрических сил. Это может быть достигнуто многими способами, например, путём нагревания.

Атомы и молекулы располагаются либо в определённом, строго закономерном, порядке, либо беспорядочно.

Все твёрдые тела, то есть тела, способные сохранять форму, по их строению можно разбить на две группы.

Одни тела состоят из частиц, в которых атомы и молекулы размещены геометрически правильно, стройными рядами. Такие тела называют кристаллическими. Это название произошло от древнегреческого слова «кристаллос», обозначавшего лёд, а также и прозрачный бесцветный кварц (горный хрусталь), который ошибочно считался окаменелым льдом. В группу кристаллических тел помимо кварца входят металлы, лёд, слюда и др.

Если нагревать какое-нибудь кристаллическое тело, например кусочек олова, то оно расплавится при вполне определённой температуре, характерной для данного вещества. В момент плавления геометрически правильное расположение атомов нарушается.

Телам, относящимся к другой группе, таким как стекло, смола или столярный клей, всегда свойственно беспорядочное размещение атомов. Подобные тела называют аморфными. В отличие от кристаллических они не имеют определённой температуры плавления и затвердевания, при нагреве постепенно размягчаются, утрачивают форму и переходят в жидкое состояние. Поскольку при этом характер расположения атомов в веществе остаётся прежним, то ясно, что аморфные тела не являются истинно твёрдыми, а относятся скорее к переохлаждённым жидкостям.

Характер пространственного расположения атомов как в кристаллических, так и в аморфных телах можно установить с помощью рентгеновских лучей, которые широко применяются для просвечивания человеческого организма.

2. Кристаллы

Кристаллическим веществам свойственно вполне определённое расположение атомов и молекул, которое называют кристаллической решёткой.

Взгляните на рис. 2. На нём изображена кристаллическая решётка поваренной соли. Ионы натрия и хлора, из которых состоит поваренная соль, размещены как бы по углам кубов, соприкасающихся своими гранями.

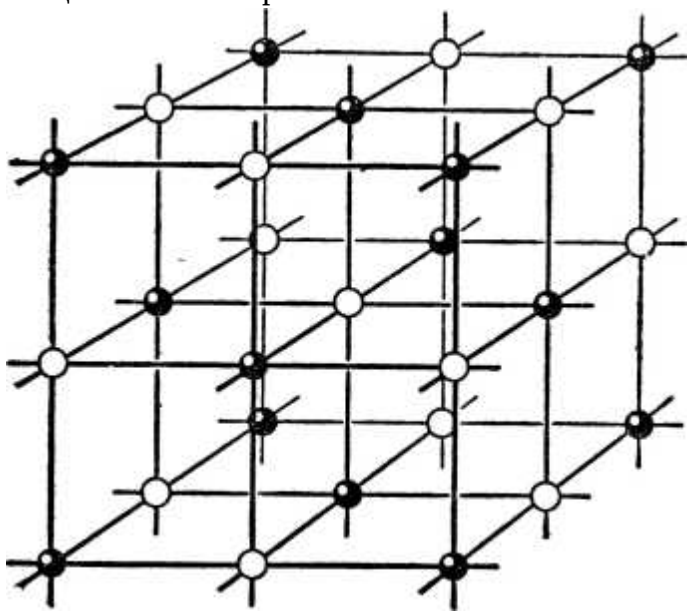


Рис. 2. *Расположение ионов в кристалле поваренной соли.*

Восемь таких кубиков образуют элементарную ячейку поваренной соли. Множество элементарных ячеек в совокупности даёт кристаллическую решётку.

Один и тот же химический элемент может образовать разные вещества с различными формами кристаллических решёток. При этом такие вещества, имея одинаковый химический состав, нередко обладают совершенно противоположными свойствами. Так, например, алмаз и графит состоят из атомов углерода, но характер расположения атомов в этих веществах различен. Поэтому они по своим физическим свойствам совсем непохожи друг на друга. Графит мягок, имеет чёрную матовую окраску. Алмаз же прозрачен и так твёрд, что им режут стекло.

Кристаллические тела бывают двух видов. Одни из них, имеющие от природы форму многогранников — кубов, пирамид и

т. п., — получили название монокристаллов (или просто кристаллов). Другие кристаллические тела не имеют многогранной формы, но если рассмотреть их под микроскопом, то можно заметить, что они состоят из множества мелких, сросшихся между собой монокристаликов. Такие тела называют поликристаллическими.

Большинство горных пород, а также все металлы, относятся к поликристаллическим телам.

Размеры монокристаллов бывают различными. У поваренной соли и сахарного песка кристаллы не больше булавочной головки, кристаллы кварца по величине иногда достигают человеческого роста (рис. 3).

Рис. 3. *Такой величины достигают кристаллы кварца.*

Распространённость кристаллических веществ в природе чрезвычайно широка. Драгоценный изумруд и обыкновенная слюда, огромные глыбы льда и крошечные снежинки относятся к миру кристаллов. Лишь очень немногие твёрдые тела имеют аморфную структуру, но и они с течением времени обычно начинают кристаллизоваться.

Так, можно наблюдать помутнение стекла. Это происходит в

результате образования в стекле кристаликов.

Если сравнить между собой кристаллы разных веществ, то легко заметить, что их форма различна. Например, кристалл поваренной соли имеет форму куба (рис. 4, *а*). Кварц кристаллизуется в виде заострённых на концах шестигранных призм (рис. 4, *б*).

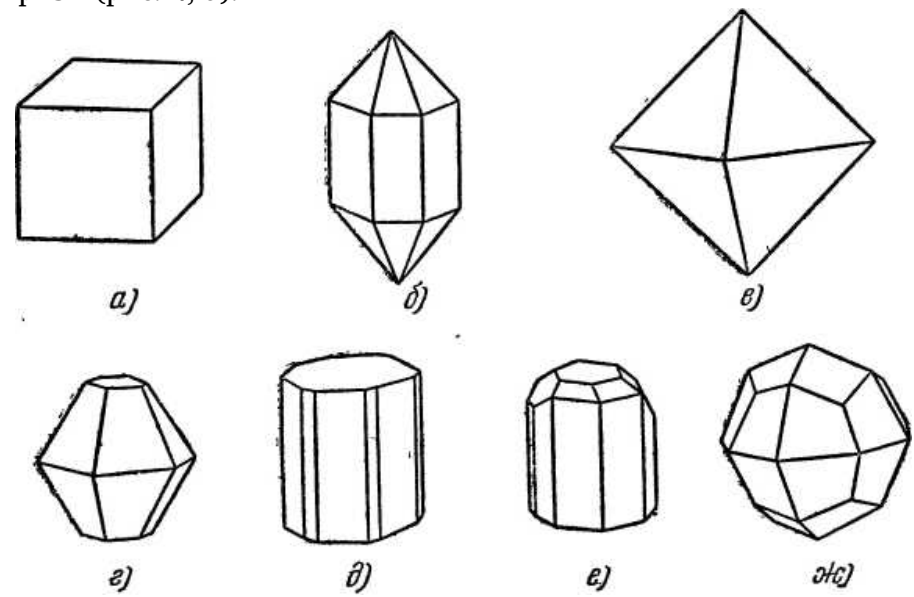


Рис. 4. *Различные формы кристаллов: а) поваренная соль, б) горный хрусталь (кварц), в) магнетит, г) корунд, д) берилл, е) топаз, ж) лейцит.*

Для сравнения на рис. 4 показаны также кристаллы различных минералов[1].

Внешняя форма кристалла зависит от его внутреннего строения — от формы кристаллической решётки и свойств среды, в которой он образуется.

Форма природных кристаллов часто бывает неправильной. Это объясняется тем, что обычно кристаллы развиваются неравномерно, и одни грани вырастают быстрее, а другие медленнее. Однако всем кристаллам одного какого-либо вещества присуще общее свойство: независимо от формы углы между одними и теми же гранями в таких кристаллах строго постоянны. Это свойство кристаллов получило название закона постоянства углов. Закон постоянства углов — один из важнейших законов науки о кристаллах — кристаллографии, основоположником которой является русский учёный Евграф Степанович Фёдоров.

Евграф Степанович Фёдоров.

Как же возникают и развиваются кристаллы?

Рассмотрим образование кристаллической решётки поваренной соли. Из рис. 2 видно, что ионы натрия и хлора в кристаллической решётке расположены по углам кубов не произвольно, а чередуясь через один, в строгом шахматном порядке. Такая закономерность расположения ионов не случайна. В природных условиях поваренная соль кристаллизуется из так называемого маточного рассола соляных озёр. В водном растворе частицы натрия и хлора существуют как в виде разрозненных ионов, так и в составе молекул поваренной соли. Каждая такая молекула состоит из положительного иона натрия и отрицательного иона хлора. Возможны три случая взаимного расположения двух молекул поваренной соли (рис. 5).

Известно, что под воздействием электрических сил разноимённо заряженные тела притягиваются друг к другу, а одноимённо заряженные — взаимно отталкиваются. Поэтому в одном случае (рис. 5, *а*) молекулы отталкиваются, в другом

(рис. 5, *б*) — притягиваются и в третьем (рис. 5, *в*) — стремятся повернуться так, чтобы занять устойчивое положение (рис. 5, *б*).

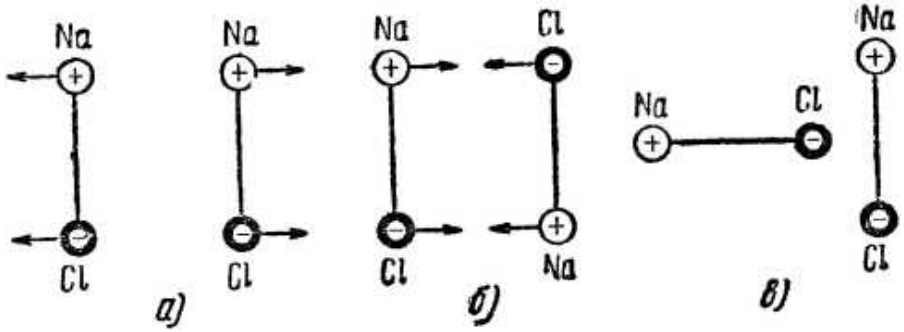


Рис. 5. *Возможные взаимные положения двух молекул поваренной соли.*

Именно по этой причине молекулы поваренной соли, а также и разрозненные ионы хлора и натрия при кристаллизации группируются между собой, располагаясь таким образом, чтобы расстояния между одноимёнными ионами были как можно большими, а между разноимёнными — как можно меньшими, то есть в шахматном порядке.

Так возникает зародыш кристалла. Постепенно его кристаллическая решётка, образованная чередующимися ионами натрия и хлора, пополняется всё новыми и новыми частицами вещества. Кристалл растёт.

Чтобы представить себе, как происходит рост кристалла, достаточно вспомнить пчелиные соты. Сооружая их, пчёлы отстраивают ячейку за ячейкой, слой за слоем, как это показано на рис. 6.

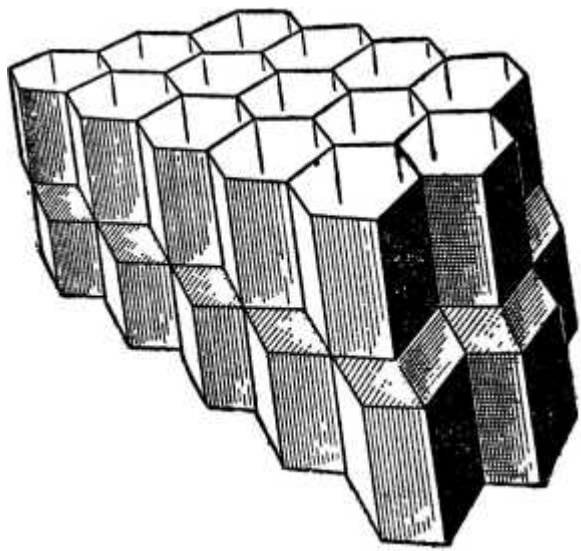


Рис. 6. *Пчелиные соты.*

Приблизительно так же растёт и кристалл. Новые слои вещества откладываются на гранях зародыша так, что грани передвигаются параллельно самим себе (рис. 7).

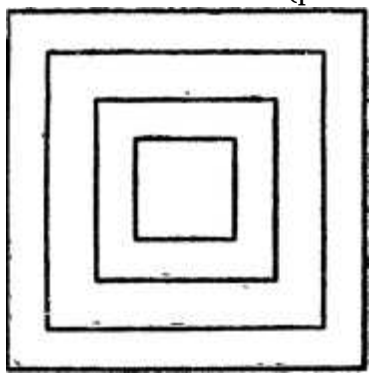


Рис. 7. *Так передвигаются грани кристалла при его росте.*

Если зародыш имел форму куба, то такую же форму будет иметь и выросший кристалл, при условии, что грани развивались равномерно.

Кристаллы могут образовываться из жидкого, твёрдого и газообразного состояний вещества. Так, снежинки — это кристалики льда, образовавшиеся из парообразного состояния воды. Кристаллизация стекла — пример образования кристаллов из твёрдого состояния.

Но проще всего получить кристалл из раствора.

Растворяя в стакане воды какое-либо растворимое вещество, например ту же поваренную соль, легко заметить, что сначала соль растворяется легко и быстро, затем всё медленнее, и, наконец, перестаёт растворяться. Следовательно, в любом ограниченном объёме воды — в стакане, ведре, бочке и т. д. — можно растворить лишь вполне определённое количество соли. Чем больше объём воды, тем большее количество соли удаётся растворить в ней. Вся же остальная соль, сколько бы её ни подсыпали в раствор, не растворившись, выпадет на дно сосуда в виде осадка. Раствор, содержащий наибольшее возможное количество растворимого вещества, называется насыщенным.

Растворимость соли зависит от температуры. В горячей воде можно растворить гораздо больше вещества, чем в холодной.

Проделайте такой опыт. Растворите 200 граммов белых (алюминиевых) квасцов в таком количестве горячей воды, чтобы на дне сосуда оставалось немного осадка. Затем остудите раствор до комнатной температуры. Поскольку растворимость квасцов при понижении температуры уменьшается, количество осадка

увеличится. Вылейте полученный насыщенный раствор в какой-либо сосуд с широким дном и низкими стенками, например, в тарелку. Такая форма сосуда необходима для того, чтобы раствор мог свободно испаряться. При испарении количество воды в сосуде будет постепенно уменьшаться, поэтому уже на следующий день на дне тарелки можно обнаружить осадок, состоящий из мелких кристаликов. Выберите из их числа несколько самых крупных, затем слейте раствор в стакан, тщательно промойте тарелку, наполните её тем же раствором и положите на дно отобранные кристалики.

С течением времени кристаллы квасцов достигнут больших размеров; следует лишь ежедневно промывать тарелку и через каждые пять-шесть дней изготавливать свежий раствор.

Такой же опыт можно проделать с хромовыми квасцами, медным купоросом и другими солями.

Попробуйте нарушить форму выращенных кристаллов, например, обломайте их уголки, и положите обломок кристалла в раствор. Пройдёт некоторое время, и повреждённые места затянутся сами собой, — кристалл примет первоначальную форму. Такое свойство кристаллов называется регенерацией, или самовосстановлением.

Однако, как уже было упомянуто, кристаллы, растущие в природных условиях, часто имеют неправильную форму. Иногда кристаллы двух или нескольких веществ срастаются между собой. В толще природного кристалла можно видеть трещины, загрязнения и воздушные пузырьки. Все эти дефекты объясняются тем, что в природе никогда не бывает благоприятных условий, которые требуются для правильного развития кристаллов.

Если рассмотреть через увеличительное стекло кусок какой-нибудь глубинной горной породы, например гранита, который состоит из полевого шпата, кварца и слюды, то можно увидеть, что зёрнышки этих веществ представляют собой мельчайшие кристалики, сросшиеся в одно целое. Почти все они имеют неправильную форму с криволинейными очертаниями. Это объясняется тем, что такие кристалики развивались одновременно в ограниченном объёме и не позволили друг другу занять то место в пространстве, которое они могли занять, если бы росли на свободе.

3. Свойства кристаллов

Согните в дугу тонкую стальную пластинку и затем отпустите её. Она выпрямится и примет первоначальную форму. Это происходит под воздействием внутренних сил упругости, которые обусловлены сцеплением между атомами металла. Силы сцепления атомов и молекул в разных веществах различны. Так, в свинце они намного меньше, чем в стали. Поэтому и упругость пластинки из свинца во много раз ниже, чем упругость стальной пластинки. Действительно, согнув свинцовую пластинку, легко убедиться, что она уже не выпрямится, а сохранит ту форму, которую ей придали при сгибании.

Возьмите обыкновенную школьную резинку. В каком направлении её ни сдавливать, она одинаково упруга. Значит, упругие свойства резины не зависят от направления приложенной силы. Тела, у которых упругость, прочность и другие физические свойства одинаковы во всех направлениях; называются изотропными. Слово «изотропный» имеет греческое происхождение и означает — одинаковый по всем направлениям. К числу изотропных относятся аморфные тела, а также полукристаллические тела при условии, что зёрна-кристалики в них расположены друг относительно друга в полном беспорядке (примером таких тел могут служить литые металлы).

Но изотропны далеко не все тела. Взгляните на кусок дерева. Он имеет волокнистую структуру. Расколоть полено поперёк волокон очень трудно, потому что их нужно перерубить. Вдоль волокон расколоть полено гораздо легче, так как в этом случае достаточно лишь отделить волокна друг от друга не перерубая их. Следовательно, прочность дерева в различных направлениях не одинакова. Тела, обладающие одинаковыми физическими свойствами в одинаковых направлениях и различными в разных, называются анизотропными. Слово «анизотропный» означает — различный в разных направлениях. В качестве примера анизотропных веществ можно назвать такие, как прокатанный металл или проволока, зёрна которых расплющены и вытянуты в определённом направлении.

К числу анизотропных веществ относятся и монокристаллы. Силы сцепления между атомами и молекулами, образующими кристаллическую решётку, в разных направлениях различны. Поэтому для многих кристаллов характерна спайность — способность раскалываться по определённым плоскостям. Это свойство легко обнаружить, например в слюде, которая свободно расщепляется на параллельные слои.

Изотропность или анизотропность различных веществ часто характеризуется их твёрдостью.

Твёрдость — это способность тела сопротивляться проникновению в него другого тела, имеющего форму острия.

Раскалите докрасна стальную пластинку и затем опустите её в холодную воду. Такая операция называется закалкой. Закалённая пластинка значительно твёрже незакалённой. Это легко обнаружить, царапая пластинки каким-либо остриём. На незакалённой пластинке царапина будет заметно глубже, чем на закалённой.

Твёрдость изотропных веществ одинакова во всех направлениях. Твёрдость анизотропных веществ различна в зависимости от направления.

Это нетрудно проверить, слегка ударив каким-либо закруглённым остриём по определённой грани кварцевого кристалла. В результате удара на поверхности кварца образуется трещина, имеющая треугольную форму. Если же ударить тем же остриём по пластинке из воска, то форма углубления будет круглой.

Оптические свойства кристаллов, их теплопроводность и другие свойства также различны в разных направлениях.

Покройте боковую грань кристалла кварца воском. Затем коснитесь середины грани кончиком нагретой иглы. Поверхность кварца воспримет тепло, и воск вокруг иглы расплавится. Если бы теплопроводность кристалла была равной во всех направлениях, расплавленный участок имел бы вид круга. В действительности же этот участок имеет форму эллипса (рис. 8).

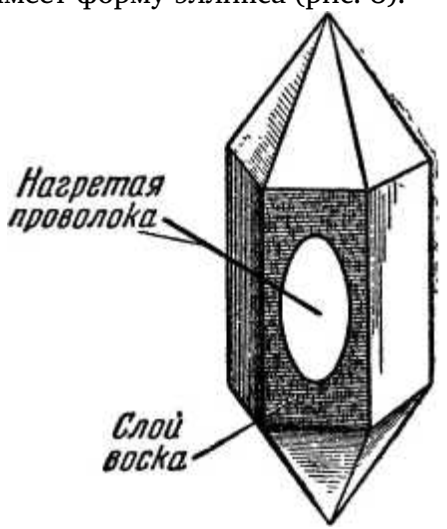


Рис. 8. *Опыт, показывающий, что теплопроводность кварцевого кристалла зависит от направления.*

Это означает, что теплопроводность кристалла различна в разных направлениях.

Чтобы знать свойства кристалла в любом направлении, нужно установить несколько основных, особо характерных направлений, так называемых координатных осей. Тогда направление любой прямой легко определить, измерив углы между этой прямой и осями.

В кристаллографии часто пользуются прямоугольной системой координат. Эта система состоит из осей, проходящих в трёх взаимно перпендикулярных направлениях (рис. 9).

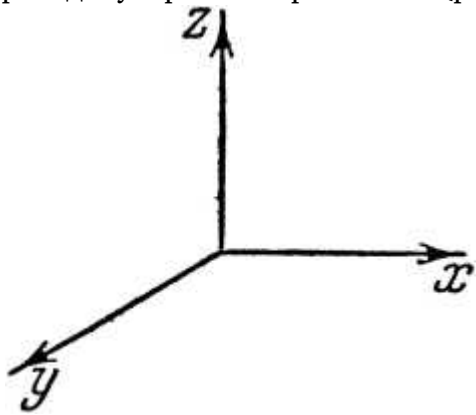


Рис. 9. *Прямоугольная система координат*.

Координатные оси обозначаются латинскими буквами *x, y* и *z* (читается: икс, игрек, зет). Ясно, что каждой оси отвечает бесчисленное множество воображаемых параллельных линий, поскольку в одних и тех же направлениях свойства кристалла неизменны.

Для примера на рис. 10 показан кристалл кварца и его координатные оси.

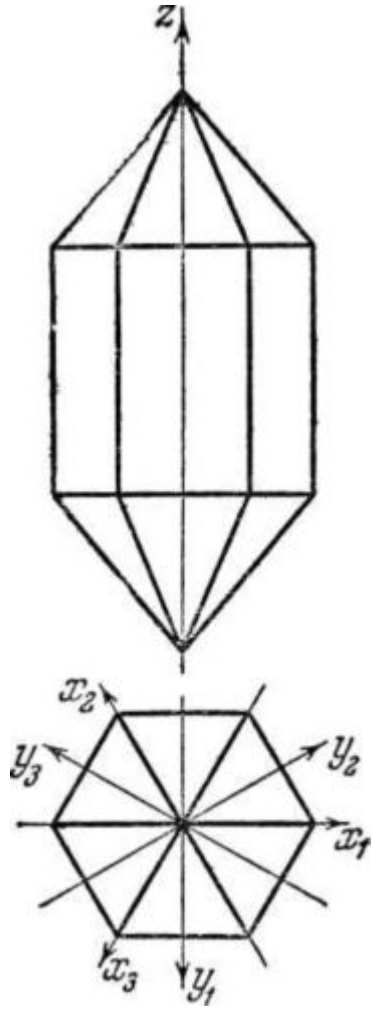


Рис. 10. *Кристалл кварца и его координатные оси. Каждой оси соответствует бесчисленное множество параллельных направлений.*

Ось *z*, проходящая через вершины кристалла, называется главной, ось *x* — электрической, а ось *y* — механической. В кристалле кварца имеется 3 электрических и 3 механических оси. В направлениях x_1, x_2, x_3 свойства кварцевого кристалла одинаковы. Они также одинаковы и в направлениях y_1, y_2, y_3. Таким образом, кристалл кварца состоит как бы из трёх одинаковых, повторяющихся частей. Подобные тела называются симметричными.

На рис. 11 изображены круг, шестиугольник и пятиконечная звезда. Всё это примеры симметричных фигур. Из рисунка видно, что каждую симметричную фигуру можно разделить на несколько одинаковых частей линиями, получившими название осей

симметрии.

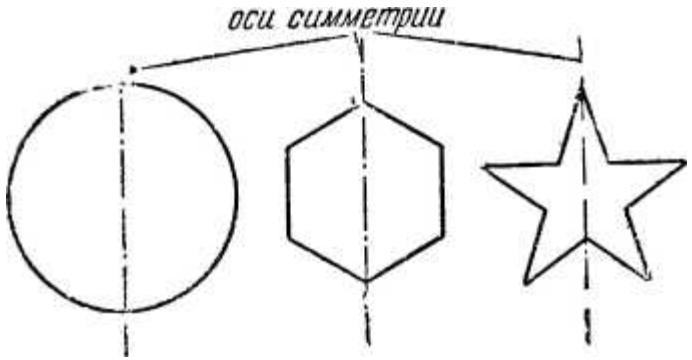


Рис. 11. *Примеры симметричных фигур — круг, шестиугольник и пятиконечная звезда.*

Если вас и ваше отражение в зеркале изобразить на бумаге, то также получится симметричная фигура, причём линия, изображающая на рисунке плоскость зеркала, будет осью симметрии. Путём поворота вокруг оси симметрии симметричные части фигуры можно совместить друг с другом.

На рис. 12 показан параллелограмм. Точка С, в которой пересекаются его диагонали, является особой точкой. В каком бы направлении мы ни проводили через неё прямую линию, отрезки, отсекаемые на этой прямой противоположными сторонами параллелограмма, всегда будут равны между собой ($CM = CH$, $CM_1 = CH_1$ и т. д.). Точку С называют центром симметрии данной фигуры.

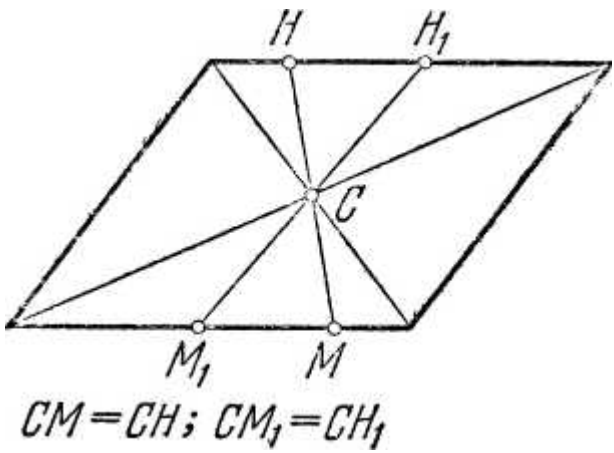


Рис. 12. *Центр симметрии параллелограмма*.

В кристаллографии понятия симметрии и центра симметрии имеют более широкий смысл. Здесь под словом симметрия понимается не только закономерная повторяемость одинаковых по форме и размеру частей кристалла, но и повторяемость его

физических свойств — упругости, твёрдости и т. д. Если провести через центр симметрии кристалла произвольную прямую, то эта прямая пересечёт поверхность кристалла в двух одинаково удалённых от центра точках. Более того, в любых равноудалённых от центра симметрии точках, лежащих на такой прямой, физические свойства кристалла будут одинаковы.

Но далеко не все кристаллы обладают центром симметрии. По своей симметричности кристаллы разделены на 32 класса. Кристаллы 21 класса не имеют центра симметрии. Такие кристаллы называются ацентричными, то есть не имеющими центра.

4. Кристалл кварца

Мы познакомились с общими свойствами кристаллов.

Рассмотрим теперь частный случай — свойства кристалла кварца, который является типичным представителем ацентричных кристаллов.

Кварц представляет собой одну из разновидностей кремнезёма; он составляет около 12 % земной кары и встречается в виде песка, бесформенной гальки и монокристаллов. Месторождения кристаллов кварца в СССР находятся на Урале, в Средней Азии, на Кавказе, в Забайкалье и других местах.

Кварцевые кристаллы имеют различную окраску. Прозрачные бесцветные кристаллы кварца, как мы уже упоминали, называют горным хрусталём. Прозрачные кристаллы фиолетового цвета известны под названием аметистов, а жёлтого — цитринов. Встречаются также полупрозрачные дымчатые и даже совершенно чёрные кварцевые кристаллы.

Окраска кварца не зависит от его кристаллической структуры. Она обусловлена примесями красящих веществ.

Кристаллы кварца обладают рядом замечательных свойств.

Кварц очень твёрд. По твёрдости он уступает лишь алмазу, корунду и топазу. Прочность и упругость кварца также весьма высоки. Чтобы разорвать кварцевый кристалл с поперечным сечением в один квадратный сантиметр, необходимо приложить силу около тысячи килограммов. При этом в момент разрыва кристалл становится длиннее всего лишь на одну тысячную долю своей первоначальной длины. Для сравнения отметим, что свинцовый стержень перед тем как разорваться, удлиняется почти вдвое.

Чтобы раздавить кварцевый кубик объёмом в один кубический сантиметр, нужно положить на его поверхность груз весом в несколько тонн.

Кварц очень плохо проводит электрический ток и незначительно расширяется при нагреве.

Если кварцевый кристалл нагреть до 1500–2000 градусов, он расплавится. Тогда из кварца, как из обычного стекла, можно изготовлять бокалы, трубки, посуду для лабораторных опытов и т. д. По виду такая посуда не отличается от стеклянной. Однако хрустальный бокал можно раскалить докрасна и затем бросить в ледяную воду — это не причинит ему ни малейшего вреда. А обычный стеклянный стакан нередко лопается, когда в него наливают кипяток.

Кварц химически устойчив. Он не растворяется ни в одной из

кислот за исключением плавиковой[2]. При высоких температурах и давлениях кварц растворяется в водном растворе соды.

Каждое лето многие из нас загорают на солнце. Загар образуется в результате действия на кожу невидимых ультрафиолетовых лучей, содержащихся в солнечном свете. Но тщетно пытались бы мы загореть от света обычной электрической лампы — простое стекло, из которого делаются баллоны ламп, не пропускает этих лучей. Если же баллон лампы изготовить не из стекла, а из плавленного кварца, то её свет также будет вызывать загар, так как кварц свободно пропускает ультрафиолетовые лучи.

Кварцевые лампы широко используются в медицине; их часто называют горным или искусственным солнцем.

Но самое интересное свойство кварцевых кристаллов было обнаружено в конце прошлого века, в 1880 г., французскими учёными-физиками Пьером и Жаком Кюри. Это открытие состояло в следующем.

Если из кварцевого кристалла вырезать пластинку (рис. 13) так, чтобы её большие грани были перпендикулярны координатной оси *x*, и поместить эту пластинку между двумя металлическими пластинами (электродами), то при сжатии кварцевой пластинки в направлении оси *x* на электродах появятся равные по величине, но различные по знаку заряды.

Рис. 13. *Кварцевая пластинка.*

Это можно заметить, присоединив к электродам электрометр — прибор для обнаружения электрического заряда (рис. 14, *а*).

Изменим направление механической силы, воздействующей на пластинку, — вместо того, чтобы сдавливать кварц, начнём растягивать его; при этом знаки зарядов на электродах изменятся: на том электроде, где при сжатии возникал положительный заряд, при растяжении появится отрицательный, и наоборот. Стрелка электрометра отклонится в обратную сторону (рис. 14, *б*).

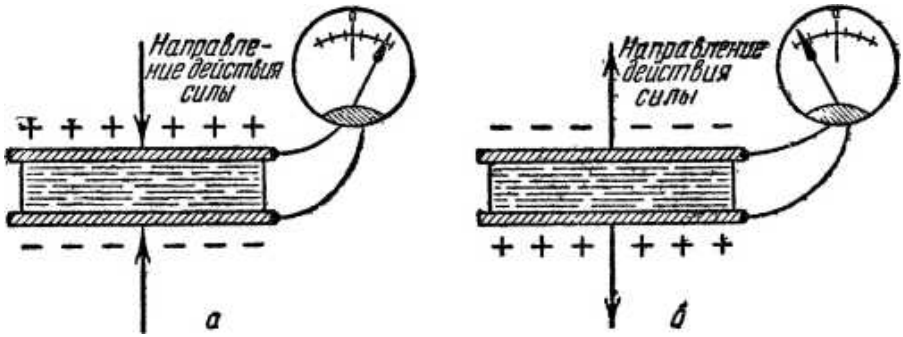


Рис. 14. *Так обнаруживается пьезоэлектрический эффект.*

Чем больше сила, сжимающая или растягивающая пластинку, тем больше и величина зарядов, возникающих на электродах, тем сильнее отклоняется стрелка электрометра.

Такое явление и было названо пьезоэлектрическим эффектом. Приставка «пьезо» происходит от греческого слова «давить», а термин «пьезоэлектричество» обозначает электричество, возникающее в результате давления.

Пьезоэлектрический эффект проявляется особенно ярко, если кристаллы кварца сжимать или растягивать в направлении электрической оси *x*. В направлении же главной оси *z* пьезоэлектрические явления отсутствуют.

Если электроды кварцевой пластинки подключить с помощью металлических проводников к какому-либо источнику электричества, например, к гальваническому элементу или аккумулятору, то произойдёт явление, обратное описанному выше: под действием электрических зарядов кварцевая пластинка сожмётся, либо, наоборот, растянется в зависимости от того, на каком электроде сосредоточены положительные заряды и на каком — отрицательные. При этом пластинка сожмётся или растянется тем сильнее, чем больше величина электрических зарядов, сосредоточенных на электродах. Такое явление носит название обратного пьезоэлектрического эффекта.

Сдавливая или растягивая пластинку, мы производим определённую работу, расходуем механическую энергию.

Но энергия не пропадает даром и не исчезает бесследно, она только превращается из одного вида в другие. Это закон природы. В случае прямого пьезоэлектрического эффекта значительная часть энергии из механической формы переходит в электрическую. А при обратном пьезоэлектрическом эффекте происходит переход электрической энергии элемента или аккумулятора в механическую энергию сжатия либо растяжения пластинки.

Таким образом, благодаря своим пьезоэлектрическим

свойствам кварцевый кристалл может быть использован в качестве преобразователя механической энергии в электрическую, и наоборот. На такой возможности и основаны многочисленные применения пьезокварца, которые будут описаны ниже.

Исследования показали, что пьезоэлектрический эффект наблюдается не только в кварце, но и в некоторых других веществах, например, в кристаллах сахара, турмалина (минерал сложного состава, содержащий бор), сегнетовой соли, которая получается из отходов виноделия, и т. д. В кристаллах же многих других веществ пьезоэлектрических явлений обнаружить не удалось.

Какова же природа пьезоэлектрического эффекта? Чем объясняется то, что он наблюдается в одних кристаллах и отсутствует в других?

5. Природа пьезоэлектричества

Рассматривая кристаллическую решётку поваренной соли (см. рис. 2), мы установили, что она образована чередующимися друг с другом положительными и отрицательными ионами. Частица вещества, содержащая в себе два разноимённых иона (или две группы разноимённых ионов), находящихся на некотором расстоянии друг от друга, называется электрическим диполем. Электрический диполь характеризуется так называемым дипольным моментом, который равен произведению величины заряда *А* на расстояние между зарядами *Б* (рис. 15).

Рис. 15. *Электрический диполь.*

Если дипольный момент равен нулю, то нет и диполя.

В аморфных телах, как, например, в смоле или эбоните, электрические диполи обычно расположены беспорядочно; поэтому в любом месте поверхности такого вещества имеется одинаковое число положительных и отрицательных ионов, разноимённые заряды которых уравновешивают, друг друга (рис. 16, *а*). Если же потереть кусочек смолы или эбонита, например о сукно, то диполи повернутся вокруг своих осей и займут одинаковые положения. При этом одноимённые полюсы диполей окажутся направленными в одну сторону. Там, где они выступят на поверхности, сосредоточатся заряды (рис. 16, *б*).

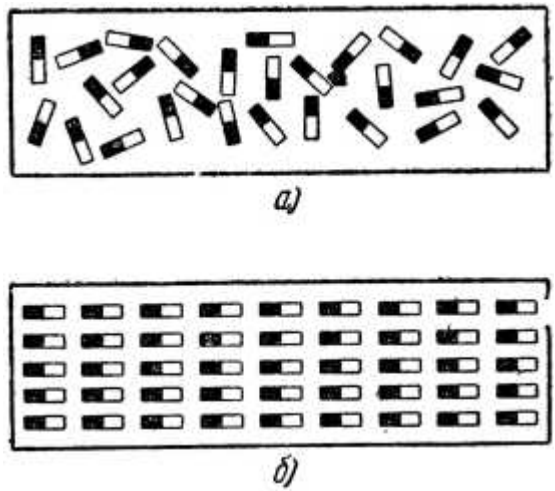


Рис. 16. *Электрические диполи: а) в неполяризованном диэлектрике, б) в поляризованном диэлектрике*.

Такое явление называется электрической поляризацией.

Существуют тела, которые обладают постоянной электрической поляризацией. Такие тела называются электретами. Они получаются искусственно из воска и некоторых смол при их затвердевании между двумя электродами, на которых сосредоточены большие электрические заряды. В расплавленном воске диполи расположены беспорядочно. Но под воздействием электрических сил они занимают одинаковые положения и сохраняют их после затвердевания. (Конечно, заряды, сосредоточенные на поверхностях электретов в результате электрической поляризации, слишком малы, чтобы подобные тела могли использоваться в качестве источников электрического тока.)

Существуют также тела, которые в обычном своём состоянии не имеют поляризации, но приобретают её при механическом сжатии или растяжении. Мы уже знаем, что подобное явление называется пьезоэлектрическим эффектом.

Тела, обладающие пьезоэлектрическими свойствами, или, как их часто называют, пьезоэлектрики, должны иметь дипольную структуру (или приобретать её при определённых условиях). В противном случае поляризация, а следовательно, и пьезоэлектрический эффект, невозможны.

Взгляните на один из восьми кубиков, образующих элементарную ячейку кристалла поваренной соли (рис. 17, *а*).

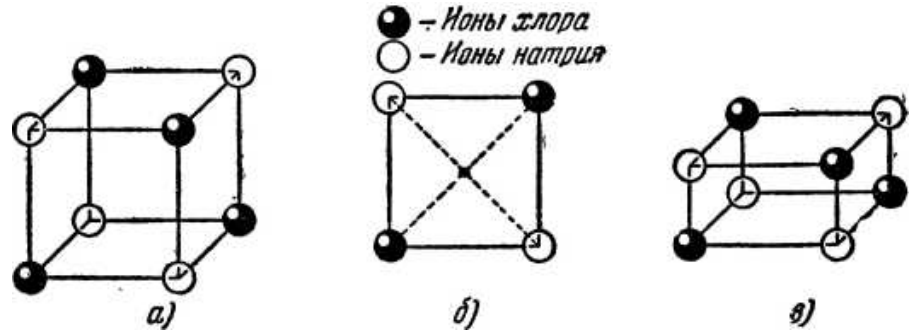


Рис. 17. *а) Один из восьми кубиков, входящих в элементарную кубическую ячейку поваренной соли, б) одна из граней кубика элементарной ячейки, в) искажение кубика в результате сжатия.*

Он образован четырьмя диполями, состоящими из ионов хлора и натрия. Казалось бы, здесь бесспорно наблюдается дипольная структура. В одном лишь кубике насчитывается четыре диполя. Но этого, оказывается, мало. Необходимо, чтобы весь кубик и элементарная ячейка в целом вели себя как диполь.

Выясним, является ли ячейка кристалла поваренной соли электрическим диполем.

В повседневной жизни мы часто встречаемся с понятием центра тяжести. Сила тяжести, или вес, обусловлена притяжением земли. Любое тело состоит из огромного числа частиц, причём каждая из них обладает своим собственным весом. Таким образом, вес всего тела складывается из множества одинаково направленных сил. Для простоты это множество сил заменяют одной силой, равной их сумме, и прикладывают данную силу к такой точке тела, где бы её действие было равносильно суммарному действию всех отдельных сил. Подобная точка называется центром тяжести. Центр тяжести шара находится в его геометрическом центре, центр тяжести цилиндра расположен на середине оси и т. д.

Система, состоящая из нескольких тел, также обладает центром тяжести. Так, например, центр тяжести двух одинаковых материальных точек (тел, размерами которых можно пренебречь по сравнению с расстоянием между ними) находится посредине прямой, соединяющей эти точки.

Определим центры тяжести ионов натрия и хлора в кристаллической решётке поваренной соли. Рассмотрим одну из граней кубика кристаллической решётки (рис. 17, *б*). Эта грань представляет собой квадрат, по углам которого расположены два иона хлора и два иона натрия. Центр тяжести двух положительных ионов лежит на середине диагонали, соединяющей эти ионы. Но там же находится и центр тяжести

отрицательных ионов, поскольку диагонали квадрата делятся пополам в одной и той же точке — точке их пересечения.

Таким же образом легко показать, что центр тяжести всех положительных ионов, входящих в любой из восьми кубиков элементарной ячейки, совпадает с центром тяжести отрицательных ионов и находится на пересечении диагоналей этого кубика, то есть в его центре симметрии. А это означает, что положительные и отрицательные заряды как бы сосредоточены в одной точке, следовательно, и кубик и ячейка в целом не имеют дипольного момента, то есть не являются электрическими диполями.

Попробуем сжать кристалл поваренной соли. Под воздействием сжатия форма кристаллической решётки искажается, и кубики, образующие элементарную ячейку, принимают вид параллелепипедов (рис. 17, *в*). Но и в этом случае центры тяжести разноимённых ионов лежат в одной точке. Следовательно, ячейка по-прежнему не является диполем.

Отсюда понятно, что в кристаллах, обладающих центром симметрии, никакие механические воздействия не возбудят электрической поляризации. Иными словами, кристаллы, имеющие центр симметрии, не обладают пьезоэлектрическими свойствами.

Другая картина наблюдается в ацентричных кристаллах. Здесь элементарные ячейки подобны электрическим диполям, поскольку центры тяжести разноимённых ионов, образующих ячейку, не совпадают. В таких кристаллах под воздействием механической силы диполи могут принимать более или менее одинаковые положения, то есть возможна электрическая поляризация.

Таким образом, пьезоэлектрический эффект можно обнаружить только в кристаллах, не имеющих центра симметрии.

А возможны ли пьезоэлектрические явления в металлах — в меди, железе, алюминии и др.?

В кристаллических ячейках металлов нет отрицательных ионов. В каждом атоме металла недостаёт одного или нескольких электронов, поэтому все атомы в металле заряжены положительно, то есть представляют собой положительные ионы. Потерянные атомами электроны беспорядочно блуждают между ионами, переходя из одной ячейки кристаллической решётки в другую. Если подключить кусок металла (например, металлическую проволоку) к какому-либо источнику электричества (гальваническому элементу, аккумулятору и т. д.), то под воздействием электрических сил электроны устремляются к его положительному полюсу. Поток электронов, движущихся в

одном направлении, и есть электрический ток. Тела, проводящие электрический ток, называют проводниками.

В кристаллических решётках неметаллических веществ — поваренной соли, кварца, алмаза, янтаря, эбонита и др. — свободные электроны отсутствуют. Поэтому такие вещества не проводят электрического тока и относятся к изоляторам (диэлектрикам).

Поскольку в проводниках отсутствуют разноимённые ионы, там не может быть и электрических диполей, а следовательно, невозможна и поляризация.

Таким образом, пьезоэлектрические явления могут происходить только в диэлектриках.

В развитии теории пьезоэлектрического эффекта огромную роль сыграли работы известных русских учёных А. В. Гадолина (1828–1892 гг.) и Е. С. Фёдорова (1853–1919 гг.), впервые установивших, что физические свойства кристаллов находятся в непосредственной связи со структурной симметрией.

6. Пьезоэлектрические текстуры

Пьезоэлектрические явления свойственны не только монокристаллам. В 1940 г. чл. — корр. Академии наук А. В. Шубников предсказал возможность существования пьезоэлектрических свойств в телах, не являющихся одиночными кристаллами. В 1941 г. гипотеза А. В. Шубникова по его предложению была экспериментально подтверждена А. С. Шеиным.

Мы уже отмечали, что изотропные кристаллические тела состоят из множества отдельных микроскопических кристаликов, расположенных друг относительно друга без всякой закономерности. Но искусственным путём можно повернуть эти кристалики так, чтобы их координатные оси были направлены более или менее одинаково.

В куске литого металла кристаллические зёрна расположены беспорядочно. Однако при протягивании проволоки или прокатке металлических листов кристаллические зёрна дробятся, расплющиваются и поворачиваются так, что элементарные ячейки кристаллической решётки выстраиваются в определённом порядке. Такое явление было впервые обнаружено советскими учёными проф. Н. Е. Успенским и чл. — корр. Академии наук С. Т. Конобеевским.

Многочисленные тела, не являющиеся одиночными кристаллами, но обладающие анизотропией, обусловленной правильной ориентировкой кристаллических зёрен, получили название текстур.

Если отдельные кристалики, образующие текстуру, обладают пьезоэлектрическими свойствами, то и текстура в целом ведёт себя как пьезоэлектрик. Такие текстуры получили название пьезотекстур.

Для изготовления пьезотекстуры не требуется сложного оборудования.

Насыпьте некоторое количество сегнетовой соли в закрытый стеклянный сосуд и поместите его в кипящую воду. После того как сегнетова соль расплавится и примет температуру кипящей воды $+100^{\circ}$ Ц, откройте сосуд и опустите в него жёсткую волосяную кисть шириной 10–20 *мм*. Дайте кисти прогреться до температуры расплава, а сами тем временем подготовьте основание, на которое будет наноситься текстура. Для этой цели лучше всего подойдёт кусочек листового металла с тщательно зачищенной поверхностью.

Теперь слегка отожмите кисть и начните наносить расплав на

поверхность металла. Штрихи следует накладывать в определённом направлении, проводя кистью по одним и тем же местам несколько раз, пока блеск расплава не изменится, что служит признаком начала кристаллизации.

Пока нанесённый на поверхность металла тонкий слой расплава не затвердел окончательно, опустите кисть в сосуд и с помощью проволочки или лезвия ножа очистите её от кристаллического осадка. Затем нанесите на пластинку новый слой расплава, однако штрихи накладывайте в обратную сторону. Количество наносимых слоёв бывает различно. Оно зависит от желаемой толщины текстуры.

Созревание игольчатых кристаликов в текстуре происходит несколько дней, после чего в ней можно обнаружить пьезоэлектрический эффект.

В годы Великой Отечественной войны сотрудники Физического института им. Лебедева Академии наук СССР под руководством чл. — корр. Академии наук Б. М. Вула открыли новый вид пьезоэлектрической текстуры — пьезокерамику.

Тщетно вы будете искать пьезоэлектрические свойства в осколке обыкновенной фарфоровой чашки. Фарфор — белая глина, прошедшая обжиг, — не является текстурой. Кристаллические решётки в различных кристаликах фарфора направлены по-разному.

Но если вязкую фарфоровую массу перед обжигом поместить между электродами, на которых сосредоточены большие электрические заряды, то под действием электрических сил ионы во всех кристаликах займут одинаковые положения. Именно таким путём получают и электреты, о которых говорилось выше.

Однако одинаковой ориентировки ионов во всех кристаллических зёрнах ещё недостаточно для того, чтобы текстура обладала пьезоэлектрическими свойствами. Необходимо, чтобы каждый кристалик в отдельности был пьезоэлектриком. Но обычный фарфор состоит из зёрен, не имеющих пьезоэлектрических свойств. Перед учёными встала сложная задача: найти вещество, которое, во-первых, способно образовать керамику и, во-вторых, является пьезоэлектриком. И такое вещество — титанат бария — было найдено.

Замешивая пьезоэлектрические кристалики в резину и пластические массы, можно придать этим веществам, в обычном состоянии изотропным, свойства пьезоэлектриков.

До сих пор мы говорили об искусственных текстурах. Но текстуры и, в частности, пьезотекстуры встречаются также и среди природных материалов. Возьмите, например, дерево. Мы уже отмечали, что оно анизотропно. Более того, древесине,

оказывается, присущи пьезоэлектрические свойства. Дерево — пьезоэлектрик. Это свойство древесины было открыто А. В. Шубниковым. Открытие А. В. Шубникова представляет большой теоретический интерес, ибо оно доказывает, что если не сами древесные волокна, то какие-то их составные части относятся к числу пьезоэлектрических веществ.

Мы рассмотрели основные свойства пьезоэлектриков, познакомились с природой пьезоэлектрического эффекта. Познакомимся теперь с важнейшими применениями этого замечательного явления. Начнём с рассказа о том, как пьезоэлектричество впервые получило путёвку в жизнь.

7. О неслышимых звуках

Во время первой мировой войны французское правительство обратилось к известному учёному физику Ланжевену с предложением найти эффективный способ дальнего обнаружения германских подводных лодок.

Для этой цели Ланжевен решил использовать ультразвуковые волны.

Со звуками человек встречается на каждом шагу. Музыка, речь, шум мчащегося поезда, щебетание птиц — всё это примеры различных звуков. Их очень много, порой они кажутся совсем непохожими друг на друга. Что общего, на первый взгляд, между раскатами грома и соловьиными трелями? И тем не менее, природа всех без исключения звуков одинакова.

Внимательно наблюдая за звучащей струной, нетрудно заметить, что она колеблется. Приложив руку к рупору работающего радиорепродуктора (громкоговорителя), также можно легко обнаружить, что он дрожит в такт звуку — в паузах между словами колебания рупора едва заметны, а во время речи они резко возрастают.

Подобные наблюдения показывают, что источниками звука являются колеблющиеся тела: голосовые связки людей или животных, струны музыкальных инструментов, движущиеся части машин и т. п.

Зажмите в тиски тонкую стальную пластинку (рис. 18).

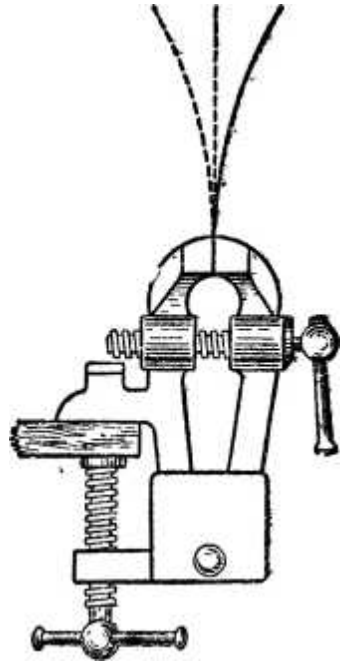


Рис. 18. *Колебания тонкой стальной пластинки.*

Отведите в сторону выступающий над тисками конец пластинки, а потом отпустите его. Пластинка начнёт колебаться. В зависимости от длины выступающей части будет слышен более низкий или более высокий тон. Чем длиннее свободная часть пластинки, тем реже будут колебания и ниже звук. Таким образом, высота звука зависит от числа колебаний тела в единицу времени (например, в секунду), или, как говорят иначе, от частоты колебаний.

Опыты показали, что человеческое ухо различает звуки, создаваемые телами, которые колеблются с частотой от 16–30 до 18 000-20 000 колебаний в секунду. Так, например, постепенно увеличивая длину свободной части зажатой в тисках пластинки, нетрудно убедиться, что при определённой длине звуки перестают быть слышимыми, хотя пластинка колеблется.

Неслышимые звуки с частотой выше 20 000-30 000 колебаний в секунду называются ультразвуками.

Из повседневного опыта мы знаем, что звук способен распространяться на значительные расстояния. Раскаты грома и орудийную канонаду можно услышать за десятки километров, а грохот мощных взрывов даже за сотни. Как это происходит?

Опустите в воду конец палки и начните её раскачивать. Во все стороны от палки побегут волны. На первый взгляд может показаться, что вместе с волнами бежит и вода. Но если приглядеться к мелким щепочкам и клочкам бумаги, плавающим

на воде, то легко заметить, что они не движутся с волнами, а лишь качаются на одном месте, периодически поднимаясь и опускаясь. Такое же колебательное движение совершают и частицы воды, причём по мере распространения волн начинают колебаться частицы, всё более и более удалённые от источника колебаний.

Подобные явления происходят и в воздухе, только воздушные волны нельзя увидеть.

Если поместить под стеклянный колпак какой-нибудь источник звука, например электрический звонок, и начать выкачивать из-под колпака воздух, то при этом звук звонка будет становиться всё слабее и слабее. Если бы мы могли выкачать из-под колпака весь находящийся там воздух, то звук вовсе не был бы слышен. Значит, в пустоте звуковые волны распространяться не могут.

Для того чтобы звук мог распространяться, необходима какая-либо материальная среда — воздух, вода, дерево, железо и т. д., — частицы которой могут приходить в колебательное движение.

Не все среды одинаково хорошо проводят звук. Чем более упруго и менее вязко вещество, тем меньшее сопротивление оказывает оно колебаниям частиц, тем ниже потери энергии при колебаниях и тем лучше распространяется звук. Так, например, в воде звуковая волна затухает медленнее, чем в воздухе; поэтому по воде звук может распространяться на большие расстояния. Ещё лучше распространяется звук по металлу. Приложив ухо к железнодорожному рельсу, можно услышать шум приближающегося поезда задолго до того, как этот шум станет слышен по воздуху. Это объясняется не только более высокой упругостью металла, но и большей скоростью, с какой звуковая волна движется по металлическим рельсам. Так, если скорость звука в воздухе равна приблизительно 340 метрам в секунду, то при распространении волны в воде она возрастает до 1440 *м/сек*, а в стали — до 5810 *м/сек*.

Встречая на своём пути какую-либо преграду, например барабанную перепонку уха, звуковые волны заставляют её колебаться, подобно тому как водяные волны раскачивают плавающие на воде щепки и клочки бумаги. Благодаря этому звук и можно услышать.

Если на пути звука возникает непреодолимое препятствие (горы, скалы, лес и т. д.), то звуковая волна отражается от этого препятствия и возвращается обратно в виде эхо.

Разрабатывая эффективный способ дальнего обнаружения подводных лодок, Ланжевен и решил использовать свойства

звуковых и ультразвуковых волн отражаться от препятствия и возвращаться назад в виде эхо. Зная скорость распространения волны в воде, а также время между посылкой короткого звукового сигнала — импульса — и его возвращением, нетрудно подсчитать расстояние до препятствия, отразившего звук (в данном случае до подводной лодки).

В то время свойства ультразвука были уже довольно хорошо изучены. Существовали достаточно мощные источники ультразвуковых волн — колеблющиеся стальные стержни и камертоны. Но все эти источники имели один крупный недостаток — они излучали звук равномерно во все стороны. Пользуясь ими, нельзя было установить направление, в котором находится препятствие, отразившее звук. Необходимо было найти новый источник ультразвука, который посылал бы ультразвуковые волны узким пучком в нужном направлении, подобно тому как прожектор направляет луч света.

После долгих опытов Ланжевен остановился на источнике (излучателе) ультразвуковых волн, основной частью которого была определённым образом установленная пьезокварцевая пластинка. Применение такого излучателя позволило Ланжевену успешно решить поставленную перед ним задачу.

Мы уже говорили, что в силу пьезоэлектрического эффекта такая пластинка сожмётся или растянется, если к её электродам подключить источник электрического тока. До сих пор мы имели дело с постоянным током, который течёт по проводам всё время в одном направлении. Но существует также переменный ток, направление которого меняется много раз в секунду. Например, ток, текущий в осветительной сети, изменяет своё направление 100 раз в секунду. Сначала он течёт по проводам в одну сторону, но, спустя сотую долю секунды, идёт в противоположную сторону, ещё через одну сотую долю секунды течёт снова в прежнем направлении и т. д.

Если электроды кварцевой пластинки подключить к осветительной сети, то пластинка в течение секунды 100 раз сожмётся и 100 раз расширится, совершив 50 полных колебаний. Колебания пластинки передадутся воздуху, и в нём будут образовываться звуковые волны.

Если знаки электрических зарядов на электродах пластинки изменяются свыше 20 000-30 000 раз в секунду, то пластинка образует в окружающей среде ультразвуковые волны.

Кварцевая пластинка излучает ультразвук в определённом направлении — под прямым углом к её большим граням. Направленное излучение волны — основное достоинство такого излучателя.

Пьезоэлектрическая пластинка может использоваться и в качестве приёмника ультразвука. Звуковая волна, встречая на пути такую пластинку, заставляет её колебаться с частотой источника звука. Опять-таки в результате пьезоэлектрического эффекта на гранях пластинки возникают заряды, знаки которых меняются соответственно звуковым колебаниям. При этом энергия звуковых колебаний преобразовывается в энергию электрических колебаний, которые могут быть затем восприняты обычным радиоприёмником.

Чем больше поверхность кварцевой пластинки, тем, естественно, мощнее излучаемый ею звук, так как в колебательное движение приводится большее число частиц воздуха. Однако площадь отдельной пластинки сравнительно невелика, поэтому вскоре была предложена кварцевая мозаика, состоящая из ряда одновременно работающих кварцевых пластин. Такая мозаика показана на рис. 19.

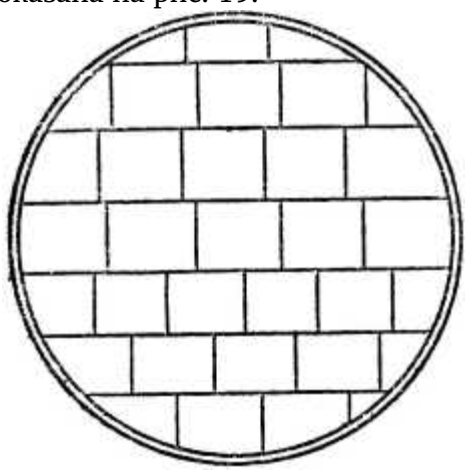


Рис. 19. *Кварцевая мозаика — излучатель ультразвука, состоящий из ряда кварцевых пластин, электрически соединённых друг с другом.*

Стали применять также пластины специальной формы, способные излучать звук весьма узким пучком.

В ультразвуковых устройствах помимо кристаллов кварца используются искусственно выращиваемые кристаллы сегнетовой соли, сульфата лития, фосфата аммония и т. д. В последнее время начала применяться пьезокерамика, позволяющая без особых трудностей изготавливать излучатели и приёмники больших размеров и любой формы.

Сейчас ультразвук находит всестороннее применение в мореплавании. С помощью ультразвуковых волн можно обнаруживать корабли, удалённые от места обнаружения на

десятки километров. Он позволяет устанавливать местоположение надводных кораблей в тумане и подводных лодок в погружённом состоянии.

С помощью специального ультразвукового прибора эхолота измеряют морские глубины, производят исследование дна, обнаруживают рифы и отмели.

Но этим не ограничивается значение ультразвука.

В 1928 г. советский учёный проф. С. Я. Соколов изобрёл ультразвуковой прибор для обнаружения трещин и раковин в металлических изделиях (различных отливках, осях и валах, орудийных стволах, турбинных лопатках и т. п.) и твёрдых пластмассах. С помощью этого прибора определяют также толщину стенок котлов и пр.

Принцип действия такого прибора мало чем отличается от описанного выше. Узкий пучок ультразвука, излучаемый пьезоэлектрической пластинкой, направляется на исследуемое изделие и проходит его насквозь. Если в толще изделия имеется трещина или раковина, которая препятствует распространению волны, то ультразвук отражается от такого препятствия и возвращается назад, где улавливается приёмником. В приёмнике он преобразуется в электрические колебания. Эти колебания направляются по проводам в специальный электрический прибор — осциллограф, на экране которого появляется характерная светящаяся кривая — осциллограмма. По виду этой кривой судят о характере дефекта. На рис. 20 показан ряд осциллограмм, получающихся при прозвучивании металлического вала со сквозным отверстием; чем больше диаметр отверстия, тем сильнее всплеск на осциллограмме.

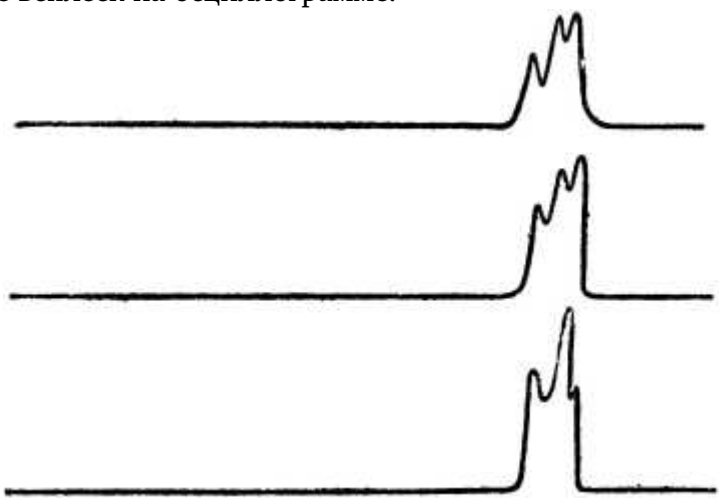


Рис. 20. *Осциллограммы, получающиеся при прозвучивании просверленного металлического вала.*

Изобретение С. Я. Соколова было в своё время описано не только в отечественной, но и в зарубежной, в том числе и американской печати. Однако современная американская литература по ультразвуку старательно замалчивает первенство советского учёного.

Ультразвуковые устройства с пьезоэлектрическими излучателями применяются и в химической промышленности. Если пропускать ультразвук через пробирку с водой, в которую добавлено немного ртути, то можно наблюдать постепенное потемнение воды. Это происходит в результате дробления ртути на мельчайшие капельки, как бы висящие в воде. Таким образом с помощью ультразвука изготавливают однородные смеси — эмульсии, широко применяемые в химии и медицине.

Коснёмся некоторых важных свойств ультразвука, которые также могут найти применение в промышленности и народном хозяйстве.

Если направить пучок ультразвуковых волн, излучаемых пьезоэлектрической пластинкой, на обыкновенный термометр, то вскоре к термометру нельзя будет прикоснуться: вследствие ультразвуковых колебаний стекла рука почувствует ожог, хотя температура, показываемая термометром, останется приблизительно прежней.

При пропускании ультразвука сквозь жидкость она, оставаясь холодной, как бы вскипает. Это объясняется способностью ультразвуковых волн высвобождать из жидкости пузырьки растворённого в ней воздуха или иного газа. Если опустить в такую жидкость рыбу или лягушку, то они мгновенно погибнут.

Учёные обнаружили также, что мощные ультразвуки оказывают влияние на характер кристаллизации тел и ускоряют некоторые химические реакции.

Мы рассмотрели только часть свойств и применений ультразвука. В настоящее время ультразвуковые системы применяют ещё в целом ряде отраслей народного хозяйства, например, в телевидении, сельском хозяйстве и геологии. И во всех случаях наиболее совершенным и удобным излучателем ультразвуковых волн оказывается пьезоэлектрическая пластинка.

8. Поющий кристалл

Первое время пьезоэлектрическая пластинка «умела» излучать лишь неслышимые ультразвуковые волны. Однако вскоре она «научилась» говорить, петь и даже играть одновременно на многих музыкальных инструментах. Этому способствовало быстрое развитие электроакустики — науки, занимающейся вопросами электрической записи и воспроизведения звуковых колебаний.

Взгляните на извилистую бороздку граммофонной пластинки. Извилины этой бороздки напоминают застывшие гребни морских волн. Игла граммофона, следуя по извилинам, колеблется с той или иной частотой. Там где они круче, частота колебаний выше, а там где положе игла колеблется с меньшей частотой.

Колебания граммофонной иглы передаются упругой мембране — тонкой, туго натянутой металлической пластинке, а от неё, через рупор, — окружающему воздуху.

Граммофон имеет целый ряд недостатков. Он воспроизводит музыку и речь с большими искажениями. Громкость воспроизведения недостаточно велика, регулировать её в соответствии с желанием слушателя невозможно.

Гораздо лучшие результаты получаются при электрическом воспроизведении грамзаписи. Схема работы электрического граммофона приведена на рис. 21.

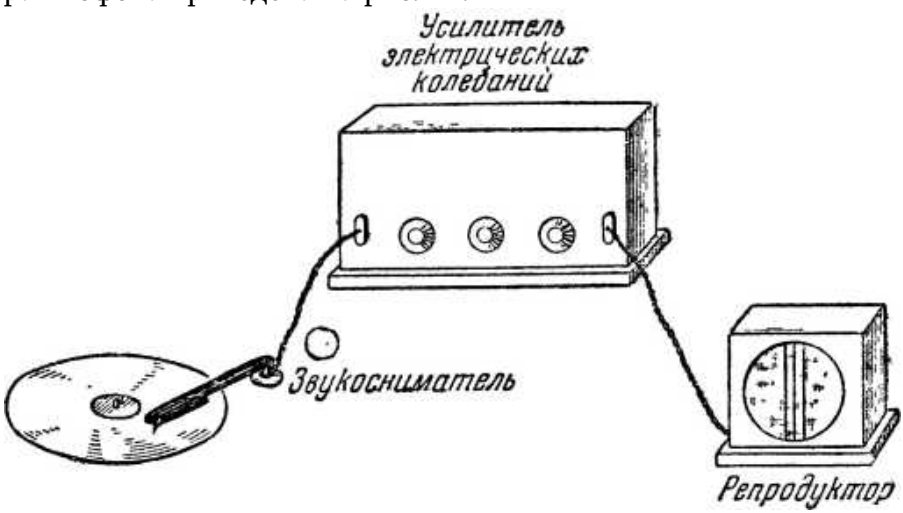


Рис. 21. *Схема электрического воспроизведения грамзаписи.*

Колебания иглы при её движении по бороздке грампластинки

передаются в этом случае особому прибору — звукоснимателю, который преобразует их в соответственные электрические колебания. Затем происходит усиление электрических колебаний и преобразование их в звук с помощью громкоговорителя.

При электрическом воспроизведении грамзаписи можно в широких пределах регулировать громкость воспроизводимой музыки или речи, изменять их тембр.

Электрические колебания, создаваемые звукоснимателем, можно передать по проводам на любое расстояние.

Наиболее распространены звукосниматели, действующие по пьезоэлектрическому принципу. В них механические колебания иглы передаются пьезоэлектрической пластинке и преобразуются ею в переменный электрический ток. Следовательно, и здесь пьезопластинка играет обычную для неё роль преобразователя энергии.

В электроакустике применяются также пьезоэлектрические микрофоны, телефоны и громкоговорители.

Микрофон — это прибор, служащий для превращения звука в электрические колебания звуковой частоты. Пьезомикрофон действует подобно приёмнику ультразвука: звуковая волна, встречая пьезоэлектрическую пластинку, заставляет её колебаться, и на электродах пластинки возникают заряды, знаки которых меняются с частотой улавливаемого звука.

Радионаушники или, как их правильнее называть, телефоны, выполняют обратную задачу. Они превращают электрические колебания в звуковые, то есть служат для воспроизведения звука. Пьезотелефон по своему устройству и действию напоминает излучатель ультразвуковых волн. Он представляет собой пьезоэлектрическую пластинку, колебания которой передаются тонкой металлической мембране, а от неё окружающему воздуху.

Если к мембране телефона или непосредственно к пьезопластинке прикрепить конический бумажный рупор, то звук будет слышен более громко. Это объясняется тем, что за счёт рупора возрастает колеблющаяся поверхность, и колебания передаются большей массе воздуха. Кроме того, излучение звуковых волн в этом случае более направленно, и их энергия концентрируется в нужном направлении. Такое устройство и называют пьезоэлектрическим громкоговорителем.

Как видим, пьезоэлектрическая пластинка, этот «поющий кристалл», может вобрать в себя звучание огромного симфонического оркестра, передать это звучание по проводам или с помощью радио на другой конец земли и воспроизвести его так, как если бы оркестр играл рядом.

Рассмотрим подробнее характерные особенности

пьезоэлектрических приборов, применяющихся в акустике. В любое пьезоакустическое устройство, будь то громкоговоритель, звукосниматель или микрофон, входит так называемый пьезоэлемент, состоящий обычно из двух склеенных между собой пластинок из кристалла сегнетовой соли. Сегнетова соль по сравнению с другими пьезоэлектриками обладает наиболее сильным пьезоэлектрическим эффектом, поэтому пластинка из сегнетовой соли очень чувствительна — самое ничтожное механическое воздействие возбуждает на электродах электрический заряд. Сегнетова соль удобна и тем, что её кристаллы легко выращиваются искусственным путём и обрабатываются. Однако ей свойственны и серьёзные недостатки — она хорошо растворяется в воде и, следовательно, боится влаги. Другой её недостаток — низкая температура плавления (приблизительно 63° Ц); кроме того, пластинка из сегнетовой соли довольно непрочна. Поэтому в настоящее время ведутся поиски заменителя сегнетовой соли, который был бы близок к ней по чувствительности и не имел её недостатков.

Электроакустический пьезоэлемент работает не на сжатие — растяжение, как кварцевый излучатель ультразвука, а на изгиб (иногда на кручение). Этим достигается максимальная чувствительность пластинки из сегнетовой соли.

Пьезоэлектрическую пластинку можно вырезать из кристалла под такими углами к координатным осям, чтобы под воздействием электрических зарядов она либо удлинялась, либо укорачивалась. Две такие пластинки склеиваются большими гранями так, чтобы при укорачивании одной из них другая удлинялась, и наоборот. Тогда элемент в целом, если к электродам подвести переменный электрический ток, будет изгибаться в ту или иную сторону в зависимости от знаков зарядов на электродах (рис. 22).

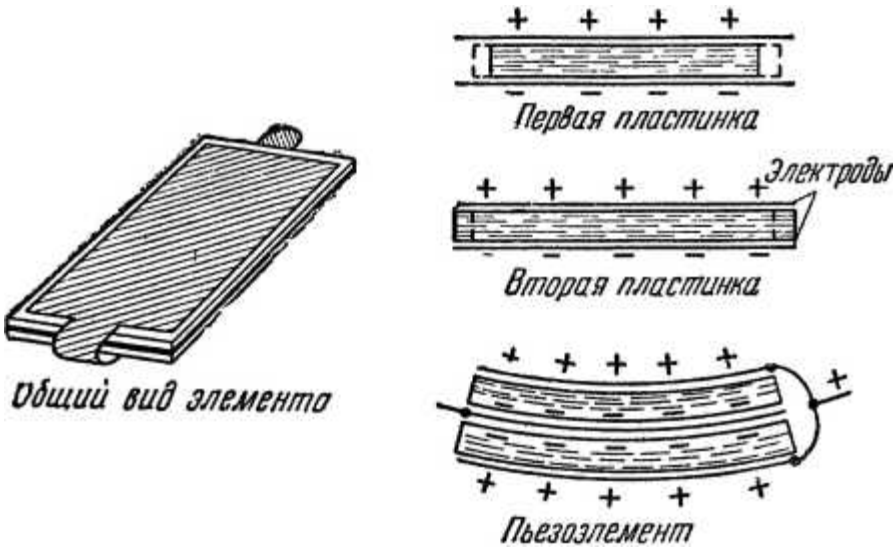


Рис. 22. *Как получаются колебания изгиба в пьезоэлектрическом элементе, состоящем из двух склеенных между собой пластинок сегнетовой соли.*

Пьезоэлемент закрепляется чаще всего по трём его углам, а четвёртый, свободный, соединяется с мембраной телефона, рупором громкоговорителя или держателем граммофонной иглы. От влаги пьезоэлементы предохраняются водонепроницаемыми оболочками из целлулоида.

Пьезоэлектрический громкоговоритель, звукосниматель или микрофон можно сделать самим. Но изготовить обычный пьезоэлемент в домашних условиях невозможно, так как для этой цели нужно вырастить кристалл сегнетовой соли нужных размеров, вырезать из него под определённым углом к координатным осям пьезоэлектрические пластинки, склеить их и т. д. Поэтому для изготовления самодельного пьезоэлемента следует воспользоваться более простым способом.

Вырежьте из куска тонкой листовой стали прямоугольную пластинку шириной 30 и длиной 90 *мм*. С помощью карандаша и линейки разделите её на три одинаковых квадрата. Средний из них покройте тонким слоем текстуры из сегнетовой соли — так, как это делалось раньше (см. стр. 26), штрихи следует проводить под углом 45° к длинному ребру пластинки. Затем изготовьте из металлической фольги («серебряной» бумаги) квадратный электрод со сторонами около 28 *мм*, слегка увлажните водой поверхность текстуры, наложите на неё электрод и притрите его с помощью ваты к увлажнённой поверхности. Роль второго электрода играет стальная пластинка, на которую нанесена текстура.

Устройство такого самодельного пьезоэлемента показано на рис. 23.

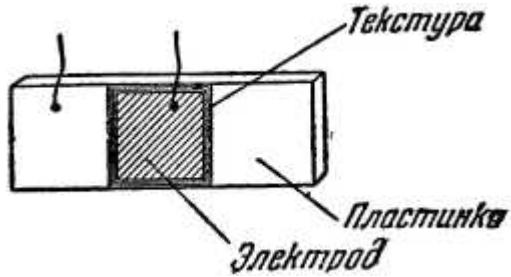


Рис. 23. *Так устроен самодельный пьезоэлемент.*

Если спустя несколько дней (время, необходимое для полного созревания текстуры) присоединить к электродам пьезоэлемента проводники и включить их в радиотрансляционную сеть, то пластинка начнёт колебаться, станет слышна радиопередача. Такие пьезоэлементы можно использовать непосредственно в качестве простейших телефонов.

А вот как можно сделать простейший звукосниматель. Прикрепите к одному из углов самодельного пьезоэлемента держатель для граммофонной иглы (такого же типа, как и в обычной мембране граммофона). К противоположной стороне пластинки нужно прикрепить металлическую трубку длиной около 150 *мм*. Свободный конец трубки укрепляется в специальном шарнире (рис. 24).

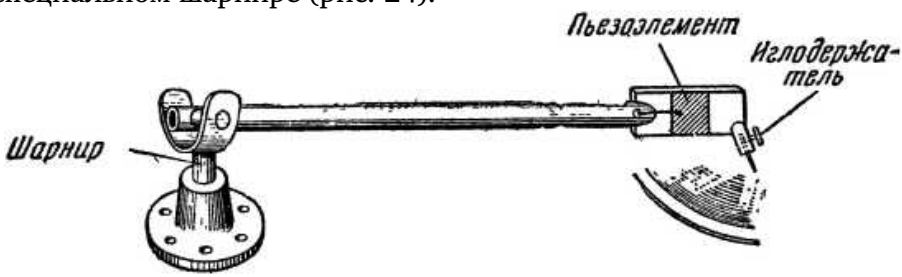


Рис. 24. *Устройство пьезоэлектрического звукоснимателя с текстурным пьезоэлементом.*

Подобный звукосниматель может успешно использоваться для воспроизведения грамзаписи. Для этого проводники, соединённые с электродами, подключаются к усилителю обычного радиоприёмника, а звукосниматель устанавливается на патефоне так, чтобы при повороте трубки вокруг оси шарнира игла совмещалась с центром пластинки.

По мере развития техники пьезоэлектрическую пластинку стали использовать и для новых целей. Об одной из них рассказывается ниже.

9. О необыкновенном манометре

Соприкасающиеся тела давят друг на друга с некоторой силой. Чернильница давит на стол; вода, налитая в сосуд, давит на его стенки; пар оказывает давление на поршень паровой машины.

Сила, воздействующая на соприкасающиеся тела, распределяется по поверхности их соприкосновения. Известно, что лыжник пройдёт по самому рыхлому снегу, а пешеход, весящий столько же, сколько и лыжник, увязнет в снегу по колено. Это происходит потому, что в первом случае сила тяжести распределяется по значительно большей площади, чем во втором.

Сила, которая действует на каждую единицу площади соприкосновения тел, называется давлением. Давление обычно выражается в килограммах на квадратный сантиметр (*кг/см2*).

Одна и та же сила, будучи приложена к различным площадям, производит разное давление. И наоборот, разные силы при определённых условиях вызывают одинаковые давления. Так, например, граммофонная игла давит на пластинку почти так же, как колесо паровоза на рельс. В обоих случаях давление равно примерно 1000 *кг/см2*. Это может показаться невероятным: ведь вес паровоза исчисляется десятками тонн, тогда как мембрана граммофона весит немногим больше ста граммов. Однако ошибки здесь нет: в первом случае вес распределяется по значительной площади, а во втором — сосредоточивается на острие иглы.

Очень часто возникает необходимость в измерении давлений. Машинист паровоза должен знать, каково давление пара в котле. Если оно слишком мало — поезд остановится, если слишком велико — может произойти взрыв котла. Метеоролог, не зная атмосферного давления, не сможет составить прогноз погоды. Врачу для определения болезни нередко требуется определить давление крови в кровеносных сосудах больного.

Измерение давлений производится с помощью специальных приборов, которые называются манометрами.

Простейший манометр представляет собой изогнутую стеклянную трубку, наполненную водой, ртутью или какой-либо иной жидкостью (рис. 25).

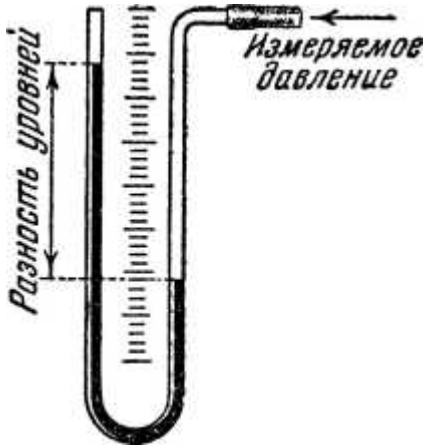


Рис. 25. *Простейший жидкостный манометр.*

Одно из колен трубки соединяется с сосудом, где нужно измерить давление (например, с котлом), другой остаётся свободным. На свободный конец трубки давит столб атмосферного воздуха. Если давление внутри сосуда равно атмосферному давлению, то они взаимно уравновешиваются, и жидкость в обоих коленах находится на одном уровне.

Если же давление в сосуде становится больше атмосферного, то жидкость в свободном колене начинает подниматься, а в колене, присоединённом к сосуду, — опушаться. Это происходит до тех пор, пока вес избытка жидкости в свободном колене не уравновесит разность давлений.

Величину давления в сосуде определяют по разности уровней жидкости в коленах трубки. Если трубка наполнена водой, то каждый сантиметр разности уровней означает давление в 1 грамм на квадратный сантиметр. Разность уровней в 10 *см* показывает, что давление внутри сосуда на 10 *г/см²* больше атмосферного.

Очень распространён также манометр, состоящий из изогнутой металлической трубки и рычажного механизма со стрелкой. Один из концов трубки запаян, а другой соединён с сосудом, в котором измеряется давление. При повышении давления в сосуде трубка манометра распрямляется и приводит во вращение стрелку. Чем больше давление, тем сильнее отклоняется стрелка.

Описанные приборы не лишены недостатков. С помощью жидкостного манометра можно измерять лишь сравнительно небольшие давления. При быстрых отклонениях давления он не успевает отмечать происшедшие изменения, что влечёт за собой ошибки.

Механический манометр тоже недостаточно совершенен. Он имеет низкую чувствительность и мало пригоден для измерения

слабых давлений. Непригоден он и для измерения очень больших давлений, например, в цилиндре двигателя (из-за недостаточной прочности металлической трубки). Таким прибором также невозможно измерять резкие изменения давлений, происходящие в сотые и тысячные доли секунды.

Упомянутые недостатки заставили учёных заняться поисками новой, более совершенной системы манометра, способной измерять и очень слабые и очень большие давления, а также регистрировать процессы, которые происходят в кратчайшие периоды времени.

Было разработано несколько типов манометров, отвечающих современным техническим требованиям и среди них — пьезоэлектрический манометр.

Мы уже знаем, что под воздействием давления на гранях пьезоэлектрической пластинки возбуждаются электрические заряды, величина которых пропорциональна давлению. Во сколько раз увеличивается давление, во столько раз возрастает и количество электричества на гранях пластинки. А эту величину можно измерить с помощью специальных электрических приборов.

Рассмотрим устройство пьезоэлектрического манометра, применяющегося при испытании паровых машин (рис. 26).

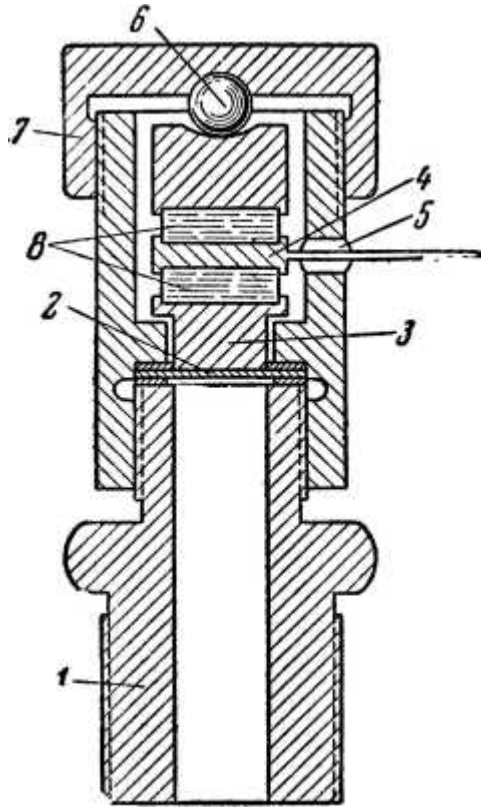


Рис. 26. *Устройство пьезоэлектрического манометра для испытания паровых машин.*

Переходная трубка *1* соединяет манометр с цилиндром паровой машины. Давление пара воздействует на мембрану *2* и через специальную шайбу *3* передаётся на две кварцевые пластинки *8*, собранные так, что одноимённые заряды на их гранях складываются. Отрицательные заряды возбуждаются на электроде *4*, а положительные — на корпусе манометра. Электрод *4* и корпус манометра соединяются проводниками с электрическим прибором, служащим для измерения величины зарядов, а следовательно, и давления. Чтобы обеспечить равномерное давление на пластинки, применяется стальной шарик *6*. Величину начального давления устанавливают при завинчивании крышки *7*.

Благодаря высокой упругости кварца пластинки под давлением сжимаются незначительно. Поэтому мембрана *2* почти не перемещается, и манометр мгновенно отмечает малейшее изменение давления.

Пьезоэлектрические манометры пригодны для измерения очень малых давлений, так как даже самое ничтожное количество

электричества на электродах пластинок может быть усилено посредством специальных устройств — усилителей, как это делается, например, в радиоприёмниках. Но такими манометрами можно измерять и огромные давления, так как прочность кварца велика.

К числу достоинств пьезоэлектрических манометров относится также возможность измерения давлений на расстоянии. При этом непосредственно на исследуемом объекте устанавливается только сам манометр. Усилительное же устройство и измерительные приборы могут удаляться на значительное расстояние, поскольку связь между ними и манометром осуществляется по проводам. В обычных механических манометрах такая связь требует сложного передаточного устройства с рычажным механизмом или особого трубопровода.

Пьезоэлектрические манометры применяются в ряде отраслей народного хозяйства нашей страны. На железнодорожном транспорте с их помощью исследуется давление, которое оказывает на рельсы проходящий поезд. В станкостроении определяются давления и усилия, возникающие при работе станков.

В метеорологии начинают находить применение пьезоэлектрические барометры — приборы для измерения атмосферного давления.

Были разработаны и пьезоэлектрические методы измерения кровяного давления, а также давления соков в стеблях и стволах растений.

10. Как пьезоэлектрическая пластинка измеряет ускорение

Представьте себе следующий довольно обычный случай из повседневной жизни.

…По улице движется трамвай. Внезапно вожатый замечает на линии зазевавшегося пешехода; он быстро выключает ток и поворачивает рукоятку тормоза. Движение трамвая мгновенно замедляется: пробежав несколько метров, он останавливается. В этот момент пассажиры ощущают резкий толчок вперёд, по ходу вагона.

Убедившись, что опасность миновала, вожатый снова включает ток, и трамвай трогается, набирая скорость. При этом пассажиры вторично испытывают толчок, но теперь в сторону, обратную движению вагона.

В обоих случаях рывки, которые испытывали пассажиры, были вызваны силой, обусловленной инерцией (инерция — свойство тел сохранять состояние покоя или прямолинейного и равномерного движения). Инерцией объясняется и движение трамвая при выключенном моторе.

Влияние инерции не исчерпывается вышеприведённым примером. С ней человек встречается на каждом шагу. Часто можно наблюдать как движется с разгона автомобиль с выключенным мотором или, не работая педалями, едет велосипедист. Их движение также обусловлено инерцией.

Чем больше масса тела, то есть количество вещества в нём, тем больше и инерция. Тяжёлый вагон труднее сдвинуть с места или затормозить, чем лёгкую тележку. Поэтому иногда говорят, что масса — это мера инерции тел.

Между массой тела, его ускорением (приростом скорости за одну секунду) или замедлением (потерей скорости за одну секунду) и силой инерции существует прямая зависимость. Чем больше масса тела и его ускорение (или замедление), тем больше эта сила. Такой закон механики иногда формулируют следующим образом: сила равна произведению массы на ускорение.

Непрерывный рост скоростей современных машин придаёт особую важность вопросам измерения ускорений. Конструктор самолёта, зная возможную величину ускорения, рассчитывает, какие силы инерции будут воздействовать на машину в полёте, и отсюда находит необходимую прочность деталей. Правильность расчёта проверяется затем лётчиком-испытателем, испытывающим опытный образец самолёта в полёте. При выходе

из пикирования, то есть из крутого, почти отвесного падения, самолёт резко теряет скорость, в этот момент детали машины и организм лётчика подвергаются громадной нагрузке, которая вызвана инерцией. Чтобы предупредить возможность разрушения самолёта, необходимо знать величину допустимого ускорения. Эта величина и устанавливается во время испытательного полёта.

Ускорение можно рассчитать, зная массу какого-либо тела и силу, действующую на него при движении с этим ускорением. Последнюю нетрудно измерить, например, с помощью пружинных весов или любого устройства для измерения давлений. На этом и основан принцип действия акселерографов — приборов, измеряющих величину ускорения.

Подобно манометрам акселерографы могут быть различных типов. Посмотрим, как устроен и работает пьезоэлектрический акселерограф, схематически изображённый на рис. 27.

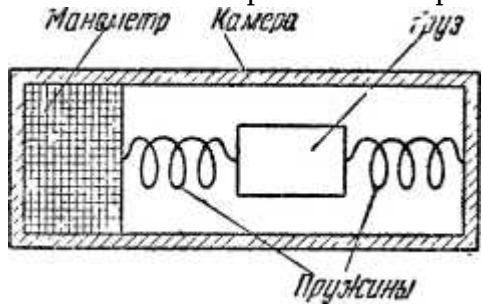


Рис. 27. *Схема пьезоэлектрического акселерографа.*

Внутри камеры (корпуса) акселерографа подвешен на жёстких пружинах груз, масса которого заранее известна.

При измерениях камера перемещается вместе с испытуемым телом (поездом, самолётом и т. д.). Сила, воздействующая на груз в результате инерции, передаётся через пружины пьезоэлектрическому манометру. Под действием этой силы на электродах манометра выделяются электрические заряды, величина которых пропорциональна силе, а следовательно, и ускорению.

С помощью пьезоэлектрических акселерографов можно не только измерять ускорения, но решать и ещё более сложные задачи. Об одной из этих задач мы сейчас и расскажем.

11. Изучение вибраций

Почти любое движение сопровождается вибрациями.

Вибрируют движущиеся части и основания станков, крылья самолётов, вращающиеся роторы электрических моторов, паровых турбин и гидрогенераторов, дрожат мосты, когда по ним проходят поезда, и т. д.

Вибрации возникают в результате воздействия сил, периодически изменяющих своё направление. Такие нагрузки, называемые знакопеременными, представляют большую опасность для любого механизма или сооружения.

Известны случаи поломки осей, валов, лопаток турбин, разрушение мостов и зданий, причина которых заключалась в знакопеременных нагрузках.

При определённых условиях размах колебаний во время вибрации резко возрастает. Так, не особенно сильная вибрация грунта, вызываемая, например, работой бензинового движка, способна иногда раскачать многоэтажное здание; строевой шаг взвода солдат — разрушить мост и т. д.

Частота вибраций (она показывает, сколько раз в единицу времени меняется нагрузка) может изменяться в широких пределах — от десятой доли до сотен и даже тысяч колебаний в секунду.

Положим, что с вибрирующим телом жёстко связана камера акселерографа. Тогда на его груз будет воздействовать сила, пропорциональная ускорению вибрирующего тела. Однако это ускорение периодически меняется по величине и характеру (ускорение — замедление) в соответствии с изменением нагрузки. Поэтому и сила, воздействующая на груз, носит знакопеременный характер. Следовательно, в цепи пьезоэлектрической пластинки возбуждается переменный электрический ток. В этом случае стрелка электрического прибора, изменяющего величину зарядов, будет колебаться с частотой вибрации, и мы не сможем уловить её показаний.

Однако эти неуловимые колебания стрелки можно зарисовать на бумаге. Для этой цели используются особые приборы — самописцы.

На рис. 28 показано, как работает простейшее самопишущее устройство.

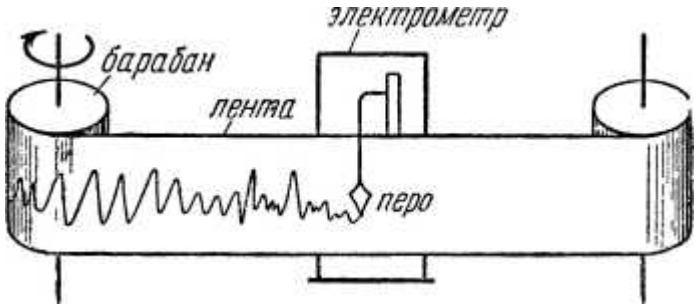


Рис. 28. *Схема простейшего самопишущего устройства.*

На барабан, вращающийся со строго постоянной скоростью, наматывается бумажная лента. Поперёк этой ленты скользит стрелка электрометра особой конструкции. На конце стрелки укреплено пишущее перо, которое оставляет на ленте свой след. Если бы лента была неподвижна, то при вибрациях перо двигалось бы вверх-вниз по одному и тому же месту. Но поскольку лента в свою очередь перемещается, перо чертит на ней извилистую линию — кривую вибраций.

Эта зарисованная на бумаге картина вибраций может быть легко расшифрована. Высота пиков на кривой показывает величину размаха колебаний вибрирующего тела. Зная скорость вращения барабана и число пиков на отрезке ленты, легко найти и частоту вибрации.

Однако при высокой частоте вибраций самопишущие устройства оказываются непригодными. Вследствие того, что детали самописца обладают инерцией, пишущее перо не успевает следовать за быстрыми движениями вибрирующего тела.

В этом случае пьезоэлектрический акселерограф соединяется с осциллографом. На экране осциллографа непосредственно наблюдается светящаяся кривая вибраций — осциллограмма, которую легко зафиксировать с помощью фотоаппарата. Примеры осциллограмм даны на рис. 29.

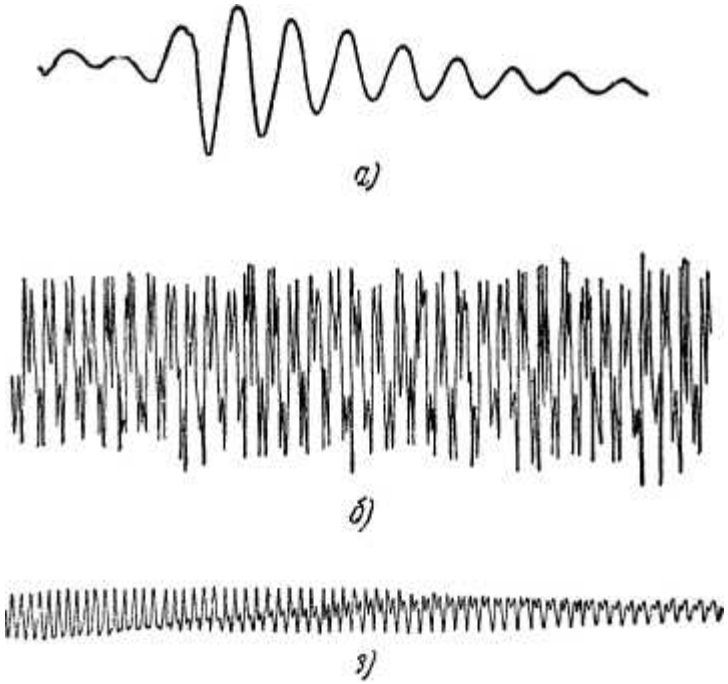


Рис. 29. *а) Кривая колебаний крыла самолёта после удара, б) кривая вибраций фундамента паровой турбины, в) колебания неотрегулированного электромотора.*

Исследовать высокочастотные вибрации возможно только при помощи пьезоэлектрических акселерографов.

12. «Ухо» хирурга

Казалось бы, зачем хирургу слух? Врачи во время операций руководствуются зрением и особым профессиональным чувством осязания, которое у опытных хирургов достигает необычайной остроты. Рука хирурга по её гибкости, чуткости и быстроте движений сравнима лишь с рукой музыканта.

А слух, нужен ли он для успеха операции?

В операционной, где нередко решается судьба человеческой жизни, царит абсолютная тишина. Движения хирурга и ассистентов совершенно бесшумны — люди понимают друг друга без слов. В этот момент еле слышный звук уже отвлекает внимание, ничтожный шорох раздражает. Одно единственное слово, сказанное «под руку», может причинить непоправимый вред.

Вот почему многие хирурги были бы, вероятно, не прочь на время операции «выключить» собственные уши, как выключают громкоговоритель, когда он мешает.

А между тем слух может стать таким же верным помощником хирурга, как осязание или зрение. Более того, богатство наших слуховых ощущений, если его суметь использовать, сулит хирургам новые возможности. Ведь зрение не может проникнуть в глубокую рану, не может обнаружить в ней осколков металла или костей.

В таких случаях хирургам приходится работать буквально «наощупь». Они исследуют глубокие ранения с помощью длинных, слегка изогнутых металлических стержней — так называемых зондов. Вводя зонд в рану, хирург медленно ощупывает её стенки и дно в поисках инородных предметов, которые нужно извлечь при операции.

Когда такой предмет, например, осколок снаряда или кусочек кости, ударяется о зонд, в зонде возникает упругая волна и рука хирурга улавливает лёгкое сотрясение.

Чтобы научиться в совершенстве владеть зондом и безошибочно угадывать характер инородного предмета, нужен большой опыт.

Зондирование значительно упростится, если упругую волну, возникающую в зонде при его столкновении с осколком, улавливать не рукой, а чувствительным пьезоэлектрическим прибором.

Такой прибор был создан во время Великой Отечественной войны на кафедре физики Ленинградского государственного педиатрического медицинского института (слово «педиатр»

означает детский врач).

Пьезоэлектрический зонд устроен очень просто. Он состоит из собственно зонда — изогнутого металлического стержня, пьезоэлектрического микрофона, к которому этот стержень прикреплён, и пьезоэлектрических телефонов. Внешний вид такого зонда показан на рисунке 30.

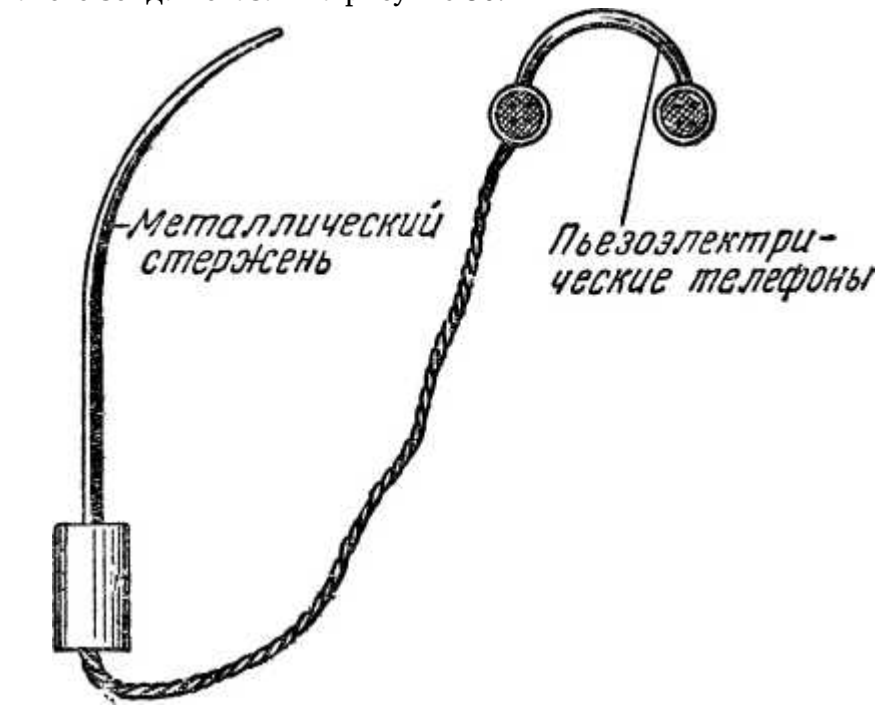


Рис. 30. *Так устроен пьезоэлектрический зонд*.

По принципу работы пьезоэлектрический зонд напоминает своего рода звукосниматель, в котором вместо иглы применён стержень. Толчок, воспринятый стержнем, передаётся пластинке из сегнетовой соли. Пластинка начинает колебаться, и на её электродах возникают электрические заряды. Эти заряды через соединительные проводники передаются к телефонам, и в телефонах слышится звук.

Чувствительность пьезоэлектрического микрофона и телефонов с пластинками из сегнетовой соли вполне достаточна для того, чтобы звук был громок. Однако она может быть повышена во много раз, если электрические колебания усилить с помощью обычного усилителя, какой есть почти в любом радиоприёмнике.

Пьезоэлектрическим зондом легко не только обнаружить осколок, но и точно установить его характер. Если осколок с зазубренными краями, звук в телефонах будет прерывистым,

похожим на царапанье. Если поверхность осколка гладкая, то звук будет похож на шорох.

Пьезоэлектрический зонд имеет и ещё одно, косвенное, достоинство. Телефоны, плотно охватывая уши хирурга, изолируют его от посторонних шумов, помогают сконцентрировать внимание на объекте операции.

По такому принципу можно переоборудовать и другие хирургические инструменты, например нож.

Разрезая мышцы различной упругости, нож вибрирует по-разному. Поэтому по характеру звука, слышимого в телефонах, врач сможет получить представление о том, какую ткань человеческого организма он разрезает.

Подобный «озвученный» нож будет «откликаться» на каждое мышечное волоконце, на каждый кровеносный сосудик, и работа хирурга значительно облегчится. Так хирург получит новое, объективное средство контроля своей работы. Различные хирургические инструменты, оснащённые пьезоэлектрическими приборами, были созданы советскими учёными — врачами и инженерами. Эти инструменты ещё не получили широкого распространения, но перспективы их применения в будущем заманчивы.

Особенно хороши такие инструменты в полевых условиях, когда операцию нужно делать немедленно, без предварительного рентгеновского исследования, без достаточно яркого освещения.

Пьезоэлектрическая аппаратура не требует ни особой регулировки, ни специального ухода. Её размеры весьма невелики — хирургические инструменты, оборудованные пьезоэлектрическими приборами, занимают немного места и могут храниться в чехлах или небольших шкафах.

Сделать и испытать пьезоэлектрический зонд или нож может любой врач, знакомый с основами пьезоэлектричества, описанными в этой книжке. Особенно хороший результат может дать применение пьезотекстурных элементов. Единственным недостатком текстуры из сегнетовой соли в данном случае является то, что она не выдерживает высокой температуры. Поэтому пьезоэлектрические инструменты нужно будет делать разборными, чтобы избежать нагрева текстурного элемента при кипячении ножа или зонда.

В промышленных образцах пьезоэлектрических элементов лучше всего применять пьезокерамику, которая не боится высоких температур. Тогда пьезоэлектрический элемент можно делать как одно целое с лезвием или стержнем.

Пьезоэлектрическую пластинку по праву можно назвать «ухом» хирурга, потому что она позволяет использовать при

проведении операций не только зрение и осязание, но и слух, который в течение многих веков был для хирургов «мёртвым капиталом».

Так пьезоэлектричество служит гуманному делу сохранения и продления человеческой жизни.

13. Пьезоэлектрический резонатор

Если качнуть маятник, то он начнёт колебаться. Размах колебаний будет постепенно затухать, но их частота останется постоянной. Именно поэтому маятник и применяют в часах.

Частота колебаний маятника зависит от его размеров и не зависит от внешних воздействий: силы первоначального толчка, сопротивления среды и т. д. Поэтому она называется собственной частотой.

Подвесим к жёсткой стойке несколько маятников. Толкнём один из них, чтобы он начал колебаться. Энергия колебаний этого маятника будет передаваться через общую стойку другим маятникам. Однако придут в колебательное движение только те маятники, собственные частоты которых совпадают с частотой колебаний первого маятника.

Передача колебаний от какого-либо колеблющегося тела другим телам, обладающим такими же собственными частотами, называется резонансом (это слово имеет латинское происхождение и означает отзвук или отклик).

Возьмём гитару. Настроим две струны на одинаковый тон. Если теперь дёрнуть одну струну, то другая сразу же отзовётся. Это ещё один пример резонанса.

Когда на упругое тело (пружину, маятник и др.) воздействует знакопеременная нагрузка с частотой, равной собственной частоте этого тела, наблюдается возрастание размаха колебаний вследствие резонанса. Поэтому, чтобы как можно сильнее раскачать качели, нужно толкать их в такт колебаниям.

Если собственная частота колебаний какой-нибудь машины совпадает с частотой вибрации, то размах колебаний резко возрастает, вплоть до разрушения той или иной детали. Именно резонансом объясняются описанные выше случаи раскачивания зданий и разрушения мостов от незначительной знакопеременной нагрузки, которая случайно действовала с резонансной частотой.

Пьезоэлектрическая пластинка, как и любое другое упругое тело, обладает собственной частотой колебаний. Переменный ток, подводимый к электродам пластинки, можно рассматривать как внешнюю силу, вызывающую её периодическое сжатие и расширение. Если частота этой внешней силы далека от собственной частоты пластинки, то размах колебаний сравнительно невелик. Но по мере приближения частоты переменного напряжения к собственной частоте пластинки размах колебаний возрастает всё более резко и при резонансе достигает максимума. В этом случае пьезоэлектрическая

пластинка является резонансной электромеханической колебательной системой, которую для простоты называют пьезоэлектрическим резонатором.

Резонансные свойства пьезоэлектрической пластинки нередко используются в известных нам ультразвуковых излучателях и приёмниках. Ведь при резонансе размах колебаний максимален, а следовательно, и наиболее велика мощность излучаемых пластинкой ультразвуковых волн.

В электроакустических приборах, напротив, стараются исключить возможность резонанса, рассчитывая пьезоэлементы так, чтобы их собственные частоты не были звуковыми. В противном случае колебания резонансной частоты воспроизводились бы гораздо громче прочих, то есть наблюдались бы искажения.

Наибольшее распространение получили пьезокварцевые резонаторы. Упругость кварца такова, что при размерах, исчисляемых миллиметрами и сантиметрами, собственные частоты кварцевых пластинок лежат в пределах от тысячи до многих миллионов колебаний в секунду. А как раз эти частоты широко применяются в одной из важнейших технических отраслей — в радиотехнике.

Благодаря высоким упругим свойствам кварцевая пластинка представляет собой весьма совершенную механическую колебательную систему, для которой характерны очень малые потери энергии. Такая система, если её привести в колебательное движение, успевает совершить сотни тысяч колебаний, прежде чем вся энергия израсходуется на преодоление сопротивления окружающей среды и трения в опорах. Для сравнения укажем, что обычный маятник после толчка делает только несколько сотен или даже десятков колебаний.

Благодаря высокой химической и температурной устойчивости кварца собственная частота кварцевого резонатора исключительно постоянна. Если кварцевую пластинку нагреть или охладить на один градус, то её собственная частота изменится всего на несколько десятитысячных, а иногда даже стотысячных долей процента.

В современной радиотехнике предъявляются очень высокие требования к устойчивости или, как говорят чаще, к стабильности частоты электрических колебаний.

Такие требования были продиктованы самой жизнью.

Для каждой радиостанции отводится своя рабочая частота. Радиослушатель, настраивая приёмник на частоту какой-либо определённой станции, слушает только её передачу, так как вследствие резонанса приёмник воспринимает лишь те

колебания, на частоту которых он настроен.

По мере развития радиовещания и связи количество действующих радиостанций всё более и более увеличивается. В эфире становится «тесно». Если стабильность частот недостаточно высока, радиостанции могут «наезжать» друг на друга, создавать взаимные помехи. При этом радиослушатель слышит одновременно передачи двух или нескольких станций, сопровождающиеся свистами и искажениями. Радиотехники стали изыскивать способы повышения стабильности. И наиболее эффективным из этих способов оказалась кварцевая стабилизация, то есть стабилизация с помощью кварцевых резонаторов.

Современная радиостанция представляет собой чрезвычайно сложное устройство. Однако в её работе много общего с работой обыкновенного часового механизма.

Возьмём часы. Положим, что пружина в них не заведена. В этом случае, качнув маятник, можно наблюдать постепенное уменьшение размаха его колебаний. Это затухание, как мы уже говорили, объясняется потерями энергии на трение в опорах и на сопротивление колебательному движению маятника со стороны окружающей среды.

Заведём пружину. Она стремится восстановить первоначальную форму. Сила упругости, стремящаяся раскрутить пружину, с помощью особого механизма передаётся маятнику и поддерживает его колебания. Поэтому часовой маятник колеблется до тех пор, пока пружина не раскрутится, и запас энергии, заключённый в ней, не уменьшится до известного предела.

Таким образом в часах происходит преобразование энергии, которая запасена заведённой пружиной, в энергию механических колебаний маятника.

Аналогичное явление имеет место и в радиопередатчике. Там происходит преобразование энергии постоянного тока, вырабатываемого источниками питания (аккумуляторами, динамомашинами и т. д.), в энергию электрических колебаний. Роль пружины играет здесь источник постоянного тока, а роль маятника — электрическая колебательная система, в качестве которой может использоваться пьезокварцевая пластинка.

Частота вырабатываемых, или, как принято говорить, генерируемых радиопередатчиком мощных электрических колебаний практически равна собственной частоте кварцевого резонатора. Но так как последняя отличается очень высокой стабильностью, стабилизируется и рабочая частота радиостанции.

В этом и заключается принцип кварцевой стабилизации.

Другим эффективным способом уплотнения эфира явилось применение пьезокварцевых фильтров в радиоприёмных устройствах. По мере сближения рабочих частот радиопередающих станций выделить желаемую программу и отстроиться от помех со стороны соседних по частоте передатчиков становится всё труднее и труднее. Как раз для этой цели и предназначены кварцевые фильтры, которые пропускают токи определённой частоты и задерживают токи всех остальных частот. Простейшим фильтром служит электрическая колебательная система.

Чем меньше потери энергии в колебательной системе, тем больше размах колебаний при резонансе и тем лучше выделяются колебания резонансной частоты. Про такую колебательную систему говорят, что она обладает высокими резонансными свойствами.

Мы уже указывали, что наименьшие потери энергии по сравнению с любой другой механической или электрической колебательной системой имеет кварцевый резонатор. Следовательно, его резонансные свойства наиболее высоки, и он может выделить передачу станции, на частоту которой настроен, даже при наличии очень близких по частоте «соседей».

Устройство, содержащее кварцевые резонаторы и предназначенное для повышения «избирательности» радиоприёмника, называется кварцевым фильтром.

Такие фильтры были созданы и описаны советским инженером Я. И. Эфрусси в 1931 г. Небезынтересно отметить, что спустя три года в США появилось сообщение об «изобретении» кварцевого фильтра американцем Мэзоном. Между тем кварцевый фильтр Мэзона — это тот же фильтр Я. И. Эфрусси.

Кварцевые фильтры применяются не только в радиоприёмниках, но и в проводной связи (телефон, телеграф). Они позволяют вести по двум проводам десятки переговоров одновременно.

* * *

Таковы основные применения пьезоэлектрического эффекта. В заключение остановимся на том, как развивается и растёт пьезоэлектрическая техника, какие проблемы стоят перед ней.

Новое в пьезоэлектрической технике

Пьезоэлектрическая техника развилась в самостоятельную техническую отрасль в годы, предшествовавшие второй мировой войне. Этому во многом способствовал бурный рост радиотехники. Во время войны ежегодный выпуск кварцевых пластинок, предназначенных для работы в различных радиоприборах, исчислялся миллионами штук.

С каждым годом потребность в кварцевых пластинках продолжает расти. Неудивительно поэтому, что уже с первых своих шагов пьезоэлектрическая техника столкнулась с проблемой нехватки сырья.

Природные запасы кристаллов кварца ограничены. Добыча кварцевого сырья очень трудоёмка. Но дело не только в этом. Если внимательно рассмотреть кристалл кварца, то в его толще можно обнаружить множество дефектов. Особенно часты пузырьки, трещины, включения других минералов. Нередко кристалл состоит из нескольких сросшихся между собой частей с различно направленными координатными осями. Поэтому только незначительная часть объёма кварцевого кристалла пригодна для производства пьезоэлектрических пластинок. Так, например, в кристаллах высшего (уникального) сорта для изготовления пластинок может быть использовано лишь 20 % объёма. А в кристаллах самого низкого (третьего) сорта используется всего 1–2% объёма.

Всё это заставило учёных подумать об искусственном выращивании кварцевых кристаллов.

Уже довольно давно люди научились получать искусственные рубины и сапфиры. Поэтому казалось, что выращивание искусственного (синтетического) кварца не должно вызвать особых затруднений. Однако первые же опыты, проведённые в начале нашего столетия, показали, насколько трудна эта задача. Синтетические кристаллы кварца получались столь мелкими, что об их практическом применении не могло быть и речи. Только совсем недавно ценой многолетних настойчивых поисков и многочисленных опытов удалось получить искусственные кристаллы, пригодные для промышленных целей.

Выращивание синтетических кристаллов кварца производится в специальных герметических (воздухонепроницаемых) резервуарах — автоклавах — при высоких температурах и под большими давлениями.

По своему качеству пьезоэлектрические пластинки, изготовленные из синтетических кристаллов кварца, не уступают

пластинкам из природного кварца.

Однако искусственные кристаллы пока ещё дороги, размеры их не удовлетворяют производственных потребностей. Поэтому одной из самых важных задач, стоящих перед пьезокварцевой техникой, является создание более совершенных способов выращивания искусственных кристаллов кварца. Не подлежит сомнению, что такие способы будут разработаны в недалёком будущем.

Другая проблема пьезоэлектрической техники — это создание дешёвого искусственного пьезоэлектрика, способного заменить кварц в некоторых областях применения. В решении этой проблемы также уже сделаны первые успешные шаги. В годы Великой Отечественной войны были созданы новые синтетические кристаллы, близкие по своим свойствам к кристаллам кварца. Среди них особый интерес представляет кристаллическое вещество сложного химического состава — этилендиаминтартрат.

Этилендиаминтартрат растворим в воде, однако значительно более влагостоек, чем, например, сегнетовая соль. По механической прочности он уступает кварцу, но зато превосходит его по силе пьезоэлектрического эффекта.

Собственная частота резонаторов из этилендиамин-тартрата так же, как и кварцевых резонаторов, мало зависит от температуры; отклонение частоты при нагреве или охлаждении резонаторов из сегнетовой соли в тысячи раз больше.

Благодаря своим достоинствам этилендиаминтартрат начинает находить практическое применение, главным образом, в фильтрах для радиотелефонии.

Резонаторы из этилендиаминтартрата могут быть использованы и для стабилизации частот радиопередатчиков в тех случаях, когда требования к устойчивости частоты колебаний не слишком велики. Некоторые типы пьезоэлектрических резонаторов имеют довольно большие размеры (до 10 *см*) и для их изготовления требуется много сырья. В этом случае применение дешёвых кристаллов этилендиаминтартрата представляет особенный интерес.

Были предприняты и поиски заменителей сегнетовой соли. Сегнетовая соль при всей её дешевизне имеет, как уже говорилось, ряд крупных недостатков. Она хрупка, отличается малой влагостойкостью, низкой температурой плавления и т. д. Требовалось найти дешёвые синтетические кристаллы, которые, с одной стороны, были бы близки к сегнетовой соли по силе пьезоэлектрического эффекта, а с другой стороны, не имели её недостатков.

Такие кристаллы были найдены. Это дигидрофосфат аммония — кристаллическое вещество со сложным химическим составом, которое обладает довольно сильным пьезоэлектрическим эффектом, отличается достаточно высокой механической прочностью, плавится при температуре около 190° Ц и сохраняет неизменность свойств при нагревании до 100°. Дигидрофосфат аммония растворим в воде, однако, в противоположность сегнетовой соли, влагостоек и может подолгу находиться во влажном воздухе.

Поэтому в последнее время дигидрофосфат аммония начинает вытеснять сегнетовую соль. Во время второй мировой войны пластинки из кристаллов этого вещества стали применять в излучателях ультразвука. Недавно в Советском Союзе были разработаны конструкции пьезоэлектрических микрофонов, звукоснимателей и других приборов с пьезоэлементами из дигидрофосфата аммония.

По мере развития пьезоэлектрической техники непрерывно совершенствуются методы производства и конструкции пьезоэлементов и резонаторов.

Так, до последнего времени в пьезоэлектрических резонаторах применялись накладные электроды в виде плоских металлических пластин. Теперь электроды делают в виде тонкого серебряного или золотого слоя, нанесённого на поверхность пластинки. Такая конструкция резонатора значительно улучшает его резонансные свойства.

Высококачественные кварцевые резонаторы собираются в стеклянных или металлических баллонах, из которых откачивается воздух. Такие резонаторы называются вакуумированными. Они отличаются исключительно высокими резонансными свойствами, так как разреженный воздух оказывает меньшее сопротивление колебаниям пластинки.

Внешний вид вакуумированного резонатора с электродами в виде тонкого металлического слоя показан на рис. 31.

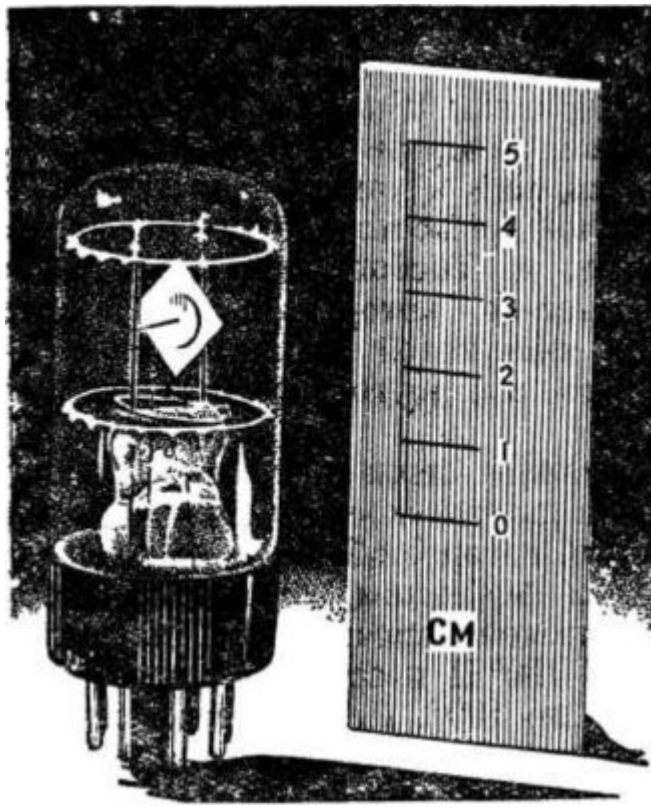


Рис. 31. *Внешний вид вакуумированного резонатора с электродами в виде тонкого металлического слоя.*

В современном пьезокварцевом производстве широко применяется автоматика. Так, например, шлифовка пластин производится на специальных плоскошлифовальных станках-автоматах.

Большие успехи достигнуты и в разработке электрических приборов с пьезорезонаторами. Созданы источники электрических колебаний с кварцевой стабилизацией, обладающие исключительно высокой стабильностью. Частота колебаний, создаваемых подобным источником, в течение месяца изменяется всего на несколько миллионных долей процента.

Такие высокостабильные генераторы электрических колебаний называют стандартами или эталонами частоты. С их помощью можно определять не только частоту, но и время.

Существуют так называемые синхронные электромоторы, отличительной особенностью которых служит строгая зависимость числа оборотов в минуту от частоты переменного электрического тока, питающего мотор. Если частота подводимого к мотору тока строго постоянна, то строго

постоянно и число оборотов в единицу времени.

Предположим, что синхронный электромотор соединён с зубчатым механизмом, вращающим часовые стрелки. Ясно, что точность таких часов будет зависеть от того, насколько стабильна частота переменного тока. Если к синхронному мотору подвести переменный ток, создаваемый стандартом частоты, то часы будут спешить или отставать всего на несколько десятитысячных долей секунды в сутки.

С обычными часами получить такую точность невозможно. Вот почему стандарты частоты применяются для особо точного измерения времени.

Мы рассмотрели далеко не все достижения современной пьезоэлектрической техники. Но и приведённые нами примеры свидетельствуют о её бурном росте и большом будущем.

Когда-то пьезоэлектрический эффект считали лишь «научным курьёзом». Жизнь опровергла это ошибочное мнение. «Научный курьёз» превратился в мощное орудие практики, положил начало новой технической отрасли.

Несомненно, что в области пьезоэлектричества будет сделано ещё немало новых открытий, ибо человеческое познание беспредельно.

В Советском Союзе созданы небывалые условия для развития науки и техники. Работа советских учёных и инженеров посвящена благородной задаче строительства коммунизма. Поэтому всемерное внедрение пьезоэлектрических приборов в народное хозяйство нашей страны — главнейшая задача специалистов пьезоэлектрической техники.

Что читать о пьезоэлектричестве

1. *А. В. Шубников*, Кварц и его применение. Изд. АН СССР, 1940 г.

2. *А. В. Шубников*, Пьезоэлектрические текстуры, Изд. АН СССР, 1946 г.

3. *Кэди*, Пьезоэлектричество, Издательство иностранной литературы, 1949 г.

4. *А. Ф. Плонский*, Пьезокварц в технике связи. Госэнергоиздат, 1951 г.

notes

Примечания

1

Минерал — химическое соединение, образовавшееся естественным путём.

2

Плавиковая кислота — химическое соединение фтора и водорода, растворённое в воде. Это очень сильная кислота. Она растворяет многие вещества. Плавиковую кислоту хранят в сосудах из парафина или эбонита, на которые она не действует.